

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO, PROGRAMACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL CONTROL DE
UN SISTEMA HIDRÁULICO DE NIVEL EMPLEANDO UN AUTÓMATA
PROGRAMABLE (PLC) CUMPLIENDO CON LA NORMA IEC1131**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DANIELA SOFÍA CRUZ GARCÉS

danycruzz@hotmail.com

JUAN SEBASTIÁN PROAÑO AVILÉS

el1985@gmail.com

DIRECTOR: Ing. MSc. ÁLVARO AGUINAGA, PhD.

aaguinaga@epn.edu.ec

Quito, Marzo 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Daniela Sofía Cruz Garcés y Juan Sebastián Proaño Avilés, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos el derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Daniela Sofía Cruz Garcés

Juan Sebastián Proaño Avilés

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Sofía Cruz Garcés y Juan Sebastián Proaño Avilés, bajo mi supervisión.

Ing. MSc. Álvaro Aguinaga. PhD

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida que me ha dado y por las enseñanzas de cada día.

A mis padres, quienes siempre me han apoyado y ayudado tanto para mi crecimiento personal como profesional.

A mi novio Luis, por su constante apoyo

Al Dr. Aguinaga no solo por brindarme sus conocimientos sino también por sus acertados consejos.

Daniela

A Dios, por darme la oportunidad de gozar de esta serie de eventos afortunados, en este mundo maravilloso.

Al Dr. Álvaro Aguinaga, por sus enseñanzas y guía tanto en el desarrollo del proyecto de titulación como en las varias oportunidades en las cuáles pude ser su alumno.

A mis padres Mercedes y Sandrino, por su apoyo incondicional durante mi vida.

A mi compañera por la amistad, el tiempo y los éxitos compartidos.

Juan Sebastián

DEDICATORIA

A mi madre Mariana quien es mi mejor
ejemplo de mujer luchadora
y de ayuda desinteresada.

Daniela

A mi abuelo Jorge

Juan Sebastián

CONTENIDO

| | |
|--|----------|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1 MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1.1 SISTEMAS DINÁMICOS | 1 |
| 1.1.1 DEFINICIÓN | 1 |
| 1.1.2 MODELADO MATEMÁTICO | 1 |
| 1.1.2.1 Tipo de sistemas: lineales y no lineales | 2 |
| 1.1.2.2 Elementos básicos | 2 |
| 1.1.2.2.1 Capacitancias | 3 |
| 1.1.2.2.2 Inertancias, Inercias o Inductancias | 3 |
| 1.1.2.2.3 Disipadores o Resistencias | 3 |
| 1.2 SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO | 4 |
| 1.2.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS | 4 |
| 1.2.1.1 Propiedades de los fluidos hidráulicos | 4 |
| 1.2.1.1.1 Densidad y volumen específico | 5 |
| 1.2.1.1.2 Peso específico y densidad específica | 5 |
| 1.2.1.1.3 Viscosidad | 6 |
| 1.2.1.2 Leyes básicas del flujo | 7 |
| 1.2.1.2.1 Número de Reynolds | 7 |
| 1.2.1.2.2 Líneas y tubos de corriente | 10 |
| 1.2.1.2.3 Flujo estable | 11 |
| 1.2.1.2.4 Volumen de control | 11 |
| 1.2.1.2.5 Ecuación de continuidad | 12 |
| 1.2.1.2.6 Ecuación de movimiento de Euler | 14 |
| 1.2.1.2.7 Ecuación de Bernoulli | 15 |
| 1.2.1.2.8 Flujo a través de un orificio. Primera aproximación a válvulas | 16 |
| 1.2.1.3 Modelado matemático | 17 |
| 1.2.1.3.1 Elementos | 18 |
| 1.2.2 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADO | 23 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.2.2.1 | Ventajas con relación a la teoría clásica..... | 23 |
| 1.2.2.2 | Características de los sistemas que se pueden analizar con esta teoría..... | 24 |
| 1.2.2.3 | Definiciones | 24 |
| 1.2.2.3.1 | Variables de estado..... | 24 |
| 1.2.2.3.2 | Espacio de estado..... | 24 |
| 1.2.2.4 | Nomenclatura de representación de ecuaciones de espacio de estado | 25 |
| 1.2.2.4.1 | Propiedad de invariancia | 27 |
| 1.2.2.5 | Métodos para la determinación del modelo de estado de un sistema | 27 |
| 1.2.2.5.1 | Método de variables de estado como variables físicas..... | 28 |
| 1.2.2.5.2 | Método de variables de estado como salida de operadores integrales | 29 |
| 1.2.2.6 | Controlabilidad..... | 29 |
| 1.2.2.7 | Observabilidad..... | 30 |
| 1.3 | SISTEMAS DE CONTROL..... | 30 |
| 1.3.1 | TIPOS DE CONTROL DE PROCESOS..... | 30 |
| 1.3.2 | ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO... .. | 32 |
| 1.3.2.1 | Sensores..... | 33 |
| 1.3.2.2 | Controlador: PLC - Autómata programable..... | 37 |
| 1.3.2.3 | Actuadores..... | 38 |
| 1.3.3 | CLASIFICACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO | 38 |
| 1.3.3.1 | Lazo abierto | 38 |
| 1.3.3.2 | Lazo cerrado o retroalimentado | 39 |
| 1.3.4 | GUÍA DE MATLAB PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS DINÁMICOS Y DE CONTROL | 44 |
| 1.3.5 | ESTUDIO DE LA NORMA IEC1131 | 48 |
| | CAPÍTULO 2 | 55 |
| 2 | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO..... | 55 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.1 | DISEÑO DEL MÓDULO | 55 |
| 2.1.1 | ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN .. | 55 |
| 2.1.2 | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS..... | 56 |
| 2.1.3 | SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE | 59 |
| 2.1.3.1 | Descripción de los candidatos | 60 |
| 2.1.3.1.1 | Opción 1. Mueble de madera disponible en el laboratorio | 60 |
| 2.1.3.1.2 | Opción 2. Mueble de madera de cuatro niveles de trabajo | 60 |
| 2.1.3.1.3 | Opción 3. Mueble de madera con perfilería en acero A36 | 60 |
| 2.1.4 | SELECCIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO..... | 63 |
| 2.1.4.1 | Descripción de los candidatos | 64 |
| 2.1.4.1.1 | Opción 1..... | 64 |
| 2.1.4.1.2 | Opción 2..... | 65 |
| 2.1.4.1.3 | Opción 3..... | 66 |
| 2.1.5 | SELECCIÓN DE LAS VÁLVULAS DE CONTROL..... | 69 |
| 2.1.5.1 | Descripción de los candidatos | 70 |
| 2.1.5.1.1 | Válvula de mariposa..... | 71 |
| 2.1.5.1.2 | Válvula de globo..... | 71 |
| 2.1.5.1.3 | Válvulas de diafragma | 72 |
| 2.1.5.2 | Evaluación para la selección | 73 |
| 2.1.6 | SELECCIÓN DE LOS MOTORES PARA AUTOMATIZAR EL CONTROL DE LAS VÁLVULAS | 77 |
| 2.1.6.1 | Descripción de los candidatos | 78 |
| 2.1.6.1.1 | Motor de DC..... | 78 |
| 2.1.6.1.2 | Servomotor..... | 79 |
| 2.1.6.1.3 | Motor paso a paso (PaP)..... | 80 |
| 2.1.6.2 | Evaluación para la selección | 83 |
| 2.1.7 | SELECCIÓN DEL CONTROLADOR..... | 86 |
| 2.2 | DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN..... | 90 |
| 2.3 | COSTOS DEL PROYECTO | 91 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 3 | 95 |
| 3 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO | 95 |
| 3.1 ESTUDIO DEL SISTEMA DINÁMICO DE NIVEL DE LÍQUIDO | 95 |
| 3.1.1 ELEMENTOS Y VARIABLES DEL SISTEMA | 95 |
| 3.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS PERTINENTES AL SISTEMA | 96 |
| 3.1.2.1 Capacitancia de los tanques | 97 |
| 3.1.2.2 Resistencia de las líneas de conducción (Tubería a la salida de cada tanque) | 97 |
| 3.1.2.2.1 Procedimiento para tanques T1 y T2 | 97 |
| 3.1.2.2.2 Procedimiento para tanque T3 | 98 |
| 3.1.2.3 Inertancia del sistema hidráulico | 101 |
| 3.1.3 DETERMINACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO DEL SISTEMA | 101 |
| 3.1.3.1 Determinación del modelo físico | 101 |
| 3.1.3.2 Determinación del modelo matemático | 103 |
| 3.1.4 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DINÁMICO CON ÁLGEBRA DE BLOQUES | 106 |
| 3.1.5 ESTUDIO DEL SISTEMA Y DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE EL USO DE MATLAB | 107 |
| 3.2 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO | 112 |
| 3.2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PID. | 112 |
| 3.2.1.1 Parámetros de diseño y referencia. | 113 |
| 3.2.1.2 Determinación de los parámetros de control PID | 114 |
| 3.2.1.3 Funciones de transferencia globales: | 129 |
| 3.2.1.4 Análisis de la respuesta del sistema controlado | 129 |
| CAPÍTULO 4 | 150 |

| | |
|---|------------|
| 4 PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE: MICROLOGIX 1100 DE ALLEN BRADLEY . | 150 |
| 4.1 PROCEDIMIENTO Y ELEMENTOS DE PROGRAMACIÓN | 150 |
| 4.2 PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO | 160 |
| 4.2.1 DESIGNACIÓN DE ELEMENTOS EMPLEADOS EN LA PROGRAMACIÓN | 160 |
| 4.2.2 ANÁLISIS DEL PROGRAMA | 162 |
| 4.3 DESCARGA DEL PROGRAMA AL PLC | 183 |
| 4.3.1 COMUNICACIÓN..... | 183 |
| 4.3.2 DESCARGA DEL PROGRAMA | 186 |
| CAPÍTULO 5 | 187 |
| 5 PROTOCOLO DE PRUEBAS..... | 187 |
| CAPÍTULO 6 | 188 |
| 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES..... | 188 |
| 6.1 RESULTADOS | 188 |
| 6.2 CONCLUSIONES..... | 189 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 190 |
| ANEXOS..... | 191 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1-1. Resumen de elementos empleados para la modelación matemática de sistemas físicos. | 19 |
| Tabla 1-2. Variables físicas escogidas como variables de estado, dependiendo del tipo de sistema estudiado..... | 28 |
| Tabla 1-3. Sensores más empleados..... | 36 |
| Tabla 1-4. Tabla de las funciones que se suelen emplear en el estudio de sistemas dinámicos y de control..... | 46 |
| Tabla 1-5. Resumen de los tipos de lenguaje de programación para PLCs..... | 50 |
| Tabla 2-1. Tabla de especificaciones del módulo didáctico | 55 |
| Tabla 2-2. Listado de materiales procedentes del Laboratorio de Automatización Industrial..... | 57 |
| Tabla 2-3. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la estructura soporte..... | 61 |
| Tabla 2-4. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes) | 61 |
| Tabla 2-5. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Peso..... | 62 |
| Tabla 2-6. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia a la corrosión por contacto con agua | 62 |
| Tabla 2-7. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento..... | 62 |
| Tabla 2-8. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia mecánica del material..... | 62 |
| Tabla 2-9. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo..... | 63 |
| Tabla 2-10. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Volumen ocupado por el módulo..... | 63 |
| Tabla 2-11. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Movilidad. | 63 |
| Tabla 2-12. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la estructura soporte..... | 67 |
| Tabla 2-13. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes) | 67 |

| | |
|---|----|
| Tabla 2-14. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Peso..... | 68 |
| Tabla 2-15. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia a la corrosión por conducción de agua..... | 68 |
| Tabla 2-16. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento..... | 68 |
| Tabla 2-17. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Flexibilidad de adaptación a la geometría..... | 68 |
| Tabla 2-18. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo..... | 69 |
| Tabla 2-19. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia presentada al flujo..... | 69 |
| Tabla 2-20. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Alimentación del sistema..... | 69 |
| Tabla 2-21. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la válvula de control..... | 74 |
| Tabla 2-22. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes)..... | 74 |
| Tabla 2-23. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de control de flujo o estrangulación..... | 75 |
| Tabla 2-24. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Caída de presión a través de la válvula..... | 75 |
| Tabla 2-25. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Torque de accionamiento..... | 75 |
| Tabla 2-26. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo..... | 76 |
| Tabla 2-27. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento..... | 76 |
| Tabla 2-28. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Disponibilidad inmediata de compra..... | 76 |
| Tabla 2-29. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de operación frecuente..... | 77 |
| Tabla 2-30. Tabla de evaluación de criterios..... | 83 |
| Tabla 2-31. Conclusión de la evaluación de las tablas anteriores..... | 83 |
| Tabla 2-32. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Precisión de posicionamiento..... | 84 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 2-33. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Velocidad de giro constante..... | 84 |
| Tabla 2-34. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de cambio de giro. | 84 |
| Tabla 2-35. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de control..... | 84 |
| Tabla 2-36. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Sensibilidad a variaciones de tensión..... | 85 |
| Tabla 2-37. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Rango de giro..... | 85 |
| Tabla 2-38. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Torque proporcionado..... | 85 |
| Tabla 2-39. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo..... | 85 |
| Tabla 2-40. Características del PLC Allen Bradley 1763-L16BBB | 86 |
| Tabla 2-41. Especificaciones de las entradas del PLC. | 87 |
| Tabla 2-42. Especificaciones de las salidas del PLC. | 88 |
| Tabla 3-1. Tabla de resumen de elementos generales que intervienen en un sistema hidráulico. | 95 |
| Tabla 3-2. Tabla de resumen de condiciones ambientales de trabajo | 96 |
| Tabla 3-3. Resumen del cálculo del área transversal de los tanques. | 97 |
| Tabla 3-4. Resumen de cálculo para la resistencia R de los tanques 1,2 y 3.. | 100 |
| Tabla 3-5. Resumen de cálculo del número de Reynolds.. | 101 |
| Tabla 3-6. Resumen de elementos que intervienen en el sistema..... | 102 |
| Tabla 3-7. Características de las matrices del sistema en espacio de estado. | 105 |
| Tabla 3-8. Tabla de resumen de parámetros presentes en el diagrama de bloques | 106 |
| Tabla 3-9. Tabla de resumen de funciones de transferencia obtenidas mediante Matlab..... | 112 |
| Tabla 3-10. Tabla de parámetros de diseño..... | 114 |
| Tabla 3-11. Tabla de tiempo de subida a máximo caudal en estado dinámico. | 114 |
| Tabla 3-12. Tabla de los valores sintonizados de k_p , k_d , k_i ; con sus respectivos parámetros de diseño..... | 128 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4-1. Resumen de comandos más empleados para la programación en RSLogix 500. | 154 |
| Tabla 4-2. Tabla de resumen de etiquetas de los elementos de la programación del módulo didáctico..... | 160 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1-1. Perfil de velocidad u de flujo laminar. Diámetro de la tubería (D), variable transversal (r), Velocidad máxima en el centro de tubería (V_c)..... | 9 |
| Fig. 1-2. Experimento de Reynolds que ilustra la característica de los flujos laminar, turbulento y de transición. | 9 |
| Fig. 1-3. Ilustración de línea de corriente, vector velocidad tangente a la línea de corriente. | 10 |
| Fig. 1-4. Representación de la ley de la continuidad..... | 12 |
| Fig. 1-5. Representación de la ecuación de movimiento de Euler..... | 14 |
| Fig. 1-6. Representación de la ley de la conservación de la energía. | 16 |
| Fig. 1-7. Representación del flujo a través de un orificio..... | 16 |
| Fig. 1-8. Ecuaciones matriciales de estado y salida de un sistema. Fuente: Propia . | 25 |
| Fig. 1-9. Nomenclatura y dimensión de las matrices envueltas en las ecuaciones estado y de salida de un sistema dinámico. Fuente: Propia | 26 |
| Fig. 1-10. Representación gráfica utilizando el álgebra de bloques para las ecuaciones de estado y de salida de un sistema dinámico..... | 26 |
| Fig. 1-11. Métodos para la determinación del modelo de estado de un sistema con comparación cualitativa de simplicidad del modelo y significado físico de sus variables. Fuente: Propia. | 27 |
| Fig. 1-12. Principales parámetros existentes en un control de variables. Fuente: propia. | 31 |
| Fig. 1-13. Control de lazo abierto. Fuente: Folleto de Control Automático | 33 |
| Fig. 1-14. Control de lazo cerrado. | 33 |
| Fig. 1-15. Representación del error por histéresis. Fuente: propia..... | 35 |
| Fig. 1-16. Representación esquemática de la precisión en un sensor mediante la máxima desviación. | 35 |
| Fig. 1-17. Esquema del funcionamiento de un control automático de lazo abierto.... | 39 |
| Fig. 1-18. Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado sin perturbaciones..... | 40 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 1-19. Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado con perturbaciones..... | 40 |
| Fig. 1-20. Representación del alcance de la norma IEC1131. | 49 |
| Fig. 1-21. Ejemplo de instrucción en lenguaje LD. | 51 |
| Fig. 1-22. Ejemplo de instrucción en lenguaje FBD..... | 52 |
| Fig. 1-23. Algunas instrucciones empleadas en el lenguaje FBD..... | 52 |
| Fig. 1-24. Ejemplo de instrucciones en lenguaje IL. | 53 |
| Fig. 1-25. Semántica y operadores empleados en lenguaje IL. | 53 |
| Fig. 1-26. Ejemplo de instrucciones en lenguaje ST. | 53 |
| Fig. 1-27. Operadores empleados en el lenguaje ST. | 54 |
| Fig. 2-1. Corte de una válvula de mariposa..... | 71 |
| Fig. 2-2. Corte válvula de globo..... | 72 |
| Fig. 2-3. Corte válvula de diafragma | 73 |
| Fig. 2-4. Motor dc de 9V, 200 rpm, 60 mA | 79 |
| Fig. 2-5. Motor dc con caja reductora de 12V..... | 79 |
| Fig. 2-6. Servomotor desmontado | 80 |
| Fig. 2-7. Motor paso a paso. Bipolar y Unipolar. | 81 |
| Fig. 2-8. Varios motores paso a paso..... | 82 |
| Fig. 3-1. Representación esquemática del sistema físico. | 102 |
| Fig. 3-2. Diagrama de bloques del sistema. | 106 |
| Fig. 3-3. Respuesta del sistema en espacio de estado. | 111 |
| Fig. 3-4. Representación del sistema de control de lazo cerrado..... | 113 |

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene el objetivo de ayudar en el aprendizaje de la Dinámica de Sistemas y del Control Automático ya que controla el nivel de varios tanques de un sistema hidráulico a través de un controlador lógico programable (PLC).

Este proyecto conlleva varias fases. La primera fase contempla desde el diseño hasta la construcción de un sistema hidráulico conformado por tres tanques comunicados entre sí.

En la segunda fase se han implantado los actuadores que trabajarán conjuntamente con el controlador para lograr que el sistema responda según los requerimientos de diseño. Entre los actuadores empleados se tiene una bomba centrífuga y dos motores paso a paso que se encuentran acoplados a dos válvulas de globo situadas a la entrada del sistema.

En la tercera fase se encuentra desarrollado el sistema de control y el programa que a través del controlador lógico programable de marca Allen Bradley es capaz de llevar el control PID del sistema.

Al final de este escrito se han plasmado las conclusiones de quienes desarrollaron este proyecto.

PRESENTACIÓN

La íntima relación entre la eficiencia de cualquier proceso mecánico y el nivel de control que el usuario debe ejercer sobre este, ha llevado desde hace algunos años a la utilización de sistemas de control automático electrónico.

A nivel industrial, se han venido incorporando sistemas de procesamiento embebidos que concentran las funciones de los circuitos electromecánicos como relés, temporizadores y contadores, entre otros, con un computador que puede funcionar en los ambientes de trabajo mas hostiles, denominados Controladores Lógicos Programables o PLCs por sus siglas en inglés. Estos controladores prestan la facilidad de poder ser programados en varios lenguajes, pero uno en particular, el "Ladder" o escalera permite la escritura de programas siguiendo una lógica sencilla con bajos tiempos de realización, lo que a su vez ha ayudado a reducir el tiempo en el que se pueden desarrollar sistemas de control.

En la universidad ecuatoriana, la necesidad de asimilar la tecnología actual, combinada con las exigencias de los programas curriculares presentan una problemática que puede satisfactoriamente ser solucionada por los mismos estudiantes a través de la realización de proyectos de titulación como el desarrollado en la páginas siguientes, con lo que se bajan costos de adquisición y se enriquece el conocimiento de los alumnos y los maestros.

Las materias de dinámica de sistemas y control automático utilizan frecuentemente el sistema de tanques comunicados con tuberías, cuyo fluido de trabajo es agua, para ejemplificar y profundizar sus fundamentos. Al implementar un sistema como el mencionado, controlado con un PLC se desarrolla una herramienta de estudio para el Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos, cuyo trabajo se basa en el de las materias nombradas.

Se presenta este proyecto final de los estudios de pregrado como una fuente de consulta para los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica y en especial a aquellos que se interesan en la disciplina de la Automatización industrial y la Ingeniería de control.

CAPÍTULO 1

1 MARCO TEÓRICO

1.1 SISTEMAS DINÁMICOS

1.1.1 DEFINICIÓN

Sistema es el conjunto de componentes que trabajan conjuntamente para alcanzar un objetivo determinado. Cada componente presenta una función particular e individual dentro del sistema. Estos componentes pueden pertenecer tanto a sistemas físicos como a fenómenos dinámicos (ciencias como la biología, economía, etc.).

Se llama sistema dinámico al sistema que cambia en el tiempo cuando no está en estado de equilibrio; es decir, su salida en tiempo presente dependerá de las condiciones de la entrada en tiempo pasado. (Será estático si tanto la entrada como la salida no cambian debido al paso del tiempo. Si la entrada en curso cambia, la salida en curso también cambiará).

1.1.2 MODELADO MATEMÁTICO

Los modelos matemáticos son descripciones matemáticas de las condiciones y características dinámicas de los sistemas, los cuales tienen el objetivo de dar a conocer o predecir el funcionamiento de un sistema antes de que este sea experimentado en la realidad, o antes de que sea construido físicamente.

Una de las maneras más sencillas y por lo tanto más empleadas para expresar estos modelos matemáticos es a través de ecuaciones diferenciales.

1.1.2.1 Tipo de sistemas: lineales y no lineales

Los sistemas lineales, como su nombre lo dice, pueden ser fácilmente representados por ecuaciones diferenciales lineales; es decir, presentan un comportamiento que si se le asemeja a una línea recta, no existirá mayor error o inexactitud en la respuesta obtenida.

A estos sistemas lineales se les puede aplicar el *principio de superposición*. El cual establece que la respuesta que se obtiene al aplicar dos funciones diferentes al mismo tiempo, es el resultado de la suma de dos respuestas individuales. Por lo tanto este tipo de sistemas pueden ser estudiados tratando las entradas individualmente y posteriormente sumando sus resultados. Es decir el resultado final teniendo varias entradas, será la suma de soluciones simples o simplificadas.

Por otro lado, los sistemas no lineales son representados por ecuaciones no lineales. Muchos de los sistemas reales son lineales solo para un determinado rango de operación.

En el caso de que no se conozca si el sistema es lineal o no, pero se ha determinado que la causa o entrada y el efecto o salida son proporcionales; entonces se ha llegado a demostrar que el sistema acepta el principio de superposición y por lo tanto, se puede decir que el sistema analizado es lineal.

1.1.2.2 Elementos básicos

Los elementos básicos que presenta cualquier tipo de sistema (ya sea eléctrico, mecánico traslacional, mecánico rotacional, hidráulico, neumático o térmico) son:

- Capacitancias o acumuladores capacitivos
- Inductancias o acumuladores inductivos
- Disipadores o también llamados resistencias

El modelo matemático de cada uno de estos elementos difiere en su nomenclatura (según sea el tipo de sistema), pero conservan el mismo principio, esto es:

1.1.2.2.1 Capacitancias.

Cambio en la cantidad de material o distancia requerido para producir un cambio unitario en potencial.¹

$$\text{Capacitancia} = \frac{\text{cambio en cantidad de material o distancia}}{\text{cambio en potencial}}$$

1.1.2.2.2 Inertancias, Inercias o Inductancias.

Cambio de potencial necesario para producir una razón de cambio unitaria en la razón de flujo, la velocidad o la corriente (cambio en la razón de flujo por segundo, cambio en la velocidad por segundo – aceleración, o cambio en la corriente por segundo).²

$$I = \frac{\text{cambio en el potencial}}{\text{cambio en la razón de flujo (velocidad o corriente) por segundo}}$$

A pesar de que estos tres términos: inertancia, inercia e inductancia representan el mismo fenómeno, generalmente para sistemas mecánicos se emplea el término inercia, para sistemas eléctricos el término inductancia y para sistemas hidráulico y neumático el término inertancia.

1.1.2.2.3 Disipadores o Resistencias.

Cambio en potencial requerido para producir un cambio unitario en la corriente.²

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Cambio en potencial}}{\text{Cambio en corriente, razón de flujo, velocidad}}$$

¹ OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág. 198; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México.

² OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág. 196; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México.

1.2 SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO

1.2.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS

Se considera fluido la sustancia en cuyo interior las moléculas se mueven libremente entre sí. Tanto gases como líquidos cumplen estas condiciones, pero la concentración de las moléculas es superior en los líquidos que en los gases, hasta el punto de que el grado de cohesión entre dichas moléculas hace que los líquidos estén obligados a mantener un volumen fijo.

Actualmente los sistemas hidráulicos tienen grandes y variadas aplicaciones en la industria y en la forma actual de producción debido a las características que presentan los fluidos (gases y líquidos). Los líquidos pueden tener una superficie libre; mientras que los gases se expanden para llenar todo el espacio de un contenedor. Otra diferencia entre líquidos y gases radica en su incompresibilidad relativa.

Para el entendimiento de los sistemas hidráulicos es necesario identificar los términos:

- *Presión*. Define a la fuerza ejercida en este caso por un fluido gaseoso o líquido sobre una superficie. En el Sistema Internacional, la unidad de presión es el Pascal (Pa):

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

- *Presión manométrica*. Esta presión es medida con referencia a la presión atmosférica.
- *Presión absoluta*. Es la presión resultante de la suma de la presión manométrica y barométrica o atmosférica.

1.2.1.1 Propiedades de los fluidos hidráulicos

El funcionamiento de cualquier sistema hidráulico depende de las características y propiedades del fluido empleado.

Este fluido debe cumplir básicamente con 3 características: buena capacidad para transmitir potencia, no ser corrosivo para el sistema que lo contiene y servir como lubricante para partes móviles produciendo el mínimo desgaste.

Las propiedades más importantes de los fluidos que se deben considerar para estudiar y dimensionar un sistema hidráulico son las siguientes:

1.2.1.1.1 Densidad y volumen específico.

Se entiende por densidad de masa (ρ) de un elemento a la relación de su masa por unidad de volumen. La densidad de un líquido depende de la presión y la temperatura, esto es:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(p - p_0) - b(\theta - \theta_0)] \quad (1)$$

Donde: ρ es la densidad, p es la presión, θ es la temperatura y ρ_0 es la densidad del líquido a la presión p_0 y a la temperatura θ_0 . Los coeficientes: a (módulo de compresibilidad) y b (coeficiente de expansión cúbica) son positivos. Al aumentar la presión, la densidad del líquido se incrementa; mientras que al aumentar la temperatura, la densidad del líquido disminuye.

El volumen específico (v) es una propiedad recíproca a la densidad, es decir nos muestra la relación del volumen que ocupa el fluido por unidad de masa de este.

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

La densidad del agua a la presión atmosférica estándar ($1.0133 \times 10^5 \frac{N}{m^2} \text{ abs}$ o también $14.7 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} \text{ abs}$) y temperatura estándar (277.15 K o también 39.2°F), es de

$$1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 62.43 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right] = 1.94 \frac{\text{slug}}{\text{ft}^3}.$$

1.2.1.1.2 Peso específico y densidad específica.

El peso específico (γ) de un fluido es la relación de su peso por unidad de volumen.

La densidad específica de un fluido, muestra la relación entre su peso con respecto al peso de un volumen igual de agua considerando la presión y temperatura estándar.

El peso específico del agua a la presión atmosférica estándar ($1.0133 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ abs o $14.7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$ abs) y temperatura estándar (277.15 K o 39.2°F), es:

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 9.807 \times 10^3 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] = 1000 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \right] = 62.43 \left[\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^3} \right]$$

Existe una relación entre la densidad y el peso específico:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad.

1.2.1.1.3 Viscosidad.

Esta es una de las propiedades más relevantes para un análisis matemático de un sistema hidráulico. Nos indica la medida de la fricción interna del fluido, o en otras palabras, la resistencia que presenta el fluido a las deformaciones tangenciales.

Este fenómeno se produce ya que los fluidos líquidos se encuentran formados por capas y el rozamiento entre las capas adyacentes es denominado: viscosidad.

Para simplificar cálculos, pero sin alejarse demasiado de la realidad, se ha considerado que un fluido no tiene viscosidad (llamándolo fluido ideal) cuando la viscosidad no produce grandes efectos en este, es decir la viscosidad es bastante pequeña.

De acuerdo a la Ley de Newton de la viscosidad, un fluido se puede clasificar como: newtoniano o no newtoniano, de esta manera, todo fluido Newtoniano presenta viscosidad.

La viscosidad se la mide mediante un parámetro que depende de la temperatura, el cual se denomina coeficiente de viscosidad o únicamente viscosidad. Este coeficiente puede ser dinámico o cinemático:

- Coeficiente de viscosidad absoluta o dinámica (η o μ). Es la fuerza tangencial por unidad de área. Unidades:
SI: $[\mu] = [\text{Pa}\cdot\text{s}] = [\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$, CGS: 1 Poise (P) = $10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s} = [10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$.
- Coeficiente de viscosidad cinemática (ν).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Es igual al cociente entre el coeficiente de viscosidad dinámica y la densidad.

Unidades:

SI: $[\nu] = [\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$. Sistema cegesimal: Stoke(St).³

La viscosidad de un fluido puede aumentar o disminuir con un cambio de temperatura. Si analizamos un fluido líquido, al aumentar la temperatura, la separación entre sus moléculas aumentará, es decir su cohesión disminuirá y como consecuencia, también disminuirá la viscosidad.

1.2.1.2 Leyes básicas del flujo.

1.2.1.2.1 Número de Reynolds

La comprensión del significado del Número de Reynolds empieza por conocer todo lo que afecta el flujo de una sustancia. Son la gravedad, la tensión superficial, la flotabilidad, la viscosidad y la inercia del fluido los generalmente considerados. El efecto más significativo se da por las dos últimas fuerzas y la razón entre estas nos indica el carácter predominante de una sobre la otra. El número de Reynolds es pues la razón entre las fuerzas de inercia del fluido y las de viscosidad del mismo, y es adimensional.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (5)$$

En donde:

Re Es el Número de Reynolds

³ <http://es.wikipedia.org/wiki/Viscosidad>

ρ Es la densidad del fluido a las condiciones de estudio $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

μ Es la viscosidad dinámica $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}\right]$

v Es la velocidad promedio del fluido $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

L Es la dimensión característica dependiente de la geometría del flujo $[\text{m}]$.

Las unidades mantienen coherencia y pertenecen al S.I.

Al concentrarnos en el flujo de líquidos a través de tuberías el número de Reynolds se expresa de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D} \quad (7)$$

En donde:

Q Es la tasa de flujo volumétrico o caudal $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$

D Es la longitud característica del flujo en el interior de una tubería, diámetro interior $[\text{m}]$

A Es la superficie del área transversal de la tubería $[\text{m}^2]$

El número de Reynolds tiene una implicación importante en el estudio del sistema dinámico hidráulico, determina el comportamiento general del fluido. Determina si tiene un movimiento laminar o turbulento, también de transición que es un punto intermedio entre los dos últimos. Debido a que el fluido a utilizar es agua, en condiciones atmosféricas no extremas, se considerarán los flujos laminar y turbulento.

El flujo laminar está predominado por las fuerzas viscosas, indicado por un número de Reynolds moderado de hasta 2100 – 2300.⁴ Es un movimiento ordenado, regular, con movimiento paralelo de sus líneas de flujo. El perfil de la velocidad es parabólico. En los fluidos newtonianos la viscosidad es una propiedad termodinámica totalmente

⁴ MORAN, M.; Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer; pág. 314; 1st ed.; John Wiley & Sons; U. S. A.

dependiente de la temperatura y la presión. Es muy sensible a la temperatura, al ascender esta, la viscosidad disminuye y por consecuencia el número de Reynolds aumenta pudiendo cambiar la característica del movimiento del fluido.

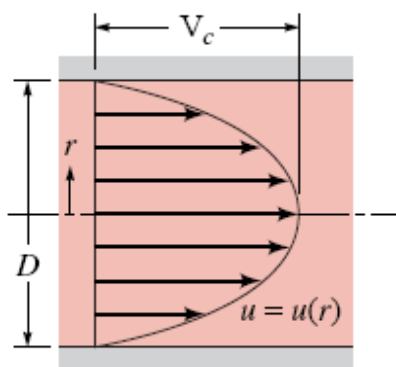


Fig. 1-1. Perfil de velocidad u de flujo laminar. Diámetro de la tubería (D), variable transversal (r), Velocidad máxima en el centro de tubería (V_c).⁵

El flujo turbulento está predominado por las fuerzas de inercia del fluido. Es un movimiento irregular con líneas de corriente que se cruzan y entremezclan. Se presenta este tipo de flujo al poseer el fluido números de Reynolds mayores a 4000. Por lo general se obtiene flujo laminar en el interior de tubos capilares, caracterizados por tener la longitud mucho mayor al diámetro interior, y en tuberías con velocidades de bajas a moderadas en relación a la viscosidad alta.

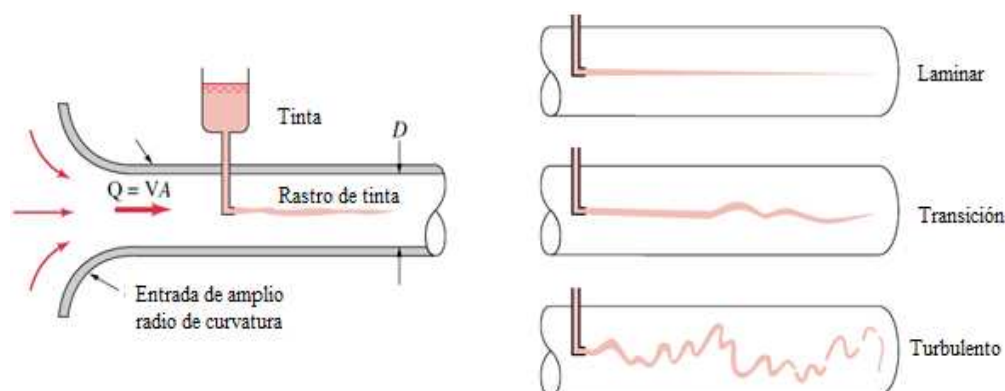


Fig. 1-2. Experimento de Reynolds que ilustra la característica de los flujos laminar, turbulento y de transición.⁵

⁵ http://www.dfa.uv.cl/~jura/Fisica_I/semana_XIII_2.pdf

El conocer el número de Reynolds de un fluido y por lo tanto el régimen de su flujo, en un determinado caso en el futuro estudio del sistema dinámico permitirán utilizar los modelos matemáticos correctos y determinar propiedades con mayor exactitud. La linealidad o no del modelo matemático de un sistema hidráulico básicamente depende de si el flujo es laminar o no dentro de sus conductos y elementos.

1.2.1.2.2 Líneas y tubos de corriente

En mecánica de fluidos se llama línea de corriente al lugar geométrico de todos los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas de fluido en un instante t determinado.

A partir de la definición anterior se define, para flujos laminares, el concepto de tubo de corriente, como la superficie formada por las líneas de flujo que parten de una curva cerrada.

En casos no estacionarios, aunque la línea cerrada no varía, el tubo de corriente y las líneas de corriente sí lo hacen. Por el contrario, para el caso estacionario el tubo de corriente permanece fijo en el espacio a lo largo del tiempo. Por lo tanto se llega a concluir que no hay flujo a través de la superficie del tubo de corriente por que la velocidad no tiene componente normal a esta. Si la velocidad es 0 entonces no existe tubo de corriente.



Fig. 1-3. Ilustración de línea de corriente, vector velocidad tangente a la línea de corriente.⁶

⁶ http://www.dfa.uv.cl/~jura/Fisica_I/semana_XIII_2.pdf

1.2.1.2.3 Flujo estable

EL flujo es estable si la presión, velocidad, densidad, temperatura en cualquier punto del mismo no cambian a través del tiempo. Si cualquiera de las condiciones anteriores no se cumple, el flujo se vuelve inestable.

1.2.1.2.4 Volumen de control

Para el estudio de fenómenos de la dinámica de sistemas se busca una metodología para tener en cuenta todo aquello útil para el estudio y denominar como efectos externos a aquellos que influyen en el sistema pero que no son preocupación del estudio principal. Básicamente un volumen de control se refiere a una región en el espacio arbitrariamente escogida con el objeto de simplificar un análisis de un caso particular.

Existen cuatro leyes básicas que determinan un volumen de control:

- a) Conservación de masa
- b) La relación del momento lineal
- c) La relación del momento angular
- d) Conservación de energía

Para el caso de un tubo de corriente con flujo estable se deben conocer:

- Ecuación de continuidad (Aplicación del principio de conservación de masa)
- Ecuación de movimiento de Euler
- Ecuación de Bernoulli

Estas últimas son particularizaciones que consideran seis condiciones para su aplicación:

- Flujo estable
- Flujo incompresible (Número de Mach menor a 0.3, completamente cumplida al usar agua).
- Flujo sin fricción o fricción despreciable.
- Flujo a lo largo de una misma línea de corriente.

- Flujo no forzado por bombas o turbinas.
- Adiabático con el exterior. Para cumplir con el requerimiento de flujo estable.

Sin embargo de conocer que en muchos casos reales estos condicionamientos no pueden ser obtenidos, se continúa con el estudio de elementos idealizados que permitan obtener modelos matemáticos generales y comprender la naturaleza del sistema dinámico.

1.2.1.2.5 Ecuación de continuidad

Basado en el principio de la conservación de la masa, el cual dice que la masa de un sistema permanece constante con el tiempo, la ecuación permite demostrar que la razón de incremento con respecto al tiempo de la masa dentro de un volumen de control es igual a la razón de cambio neto de masa que fluye hacia el volumen de control.

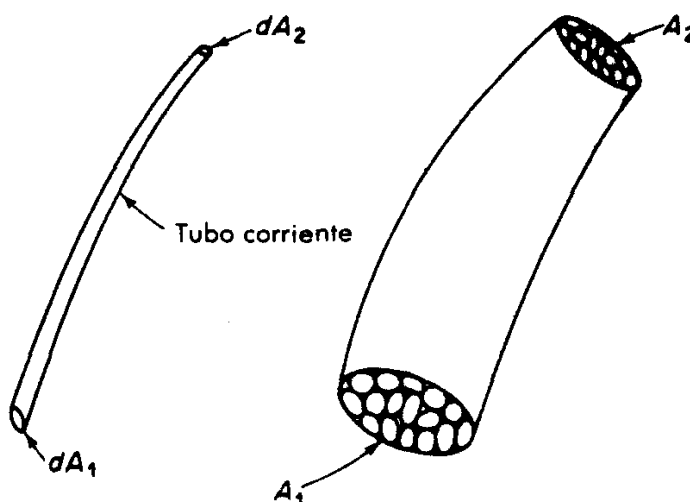


Fig. 1-4. Tubo de corriente (izquierda). Conjunto de tubos de corriente (derecha).⁷

Aplicada a dos secciones transversales a lo largo de un tubo de corriente en flujo estable la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2 \quad (8)$$

Donde:

⁷ OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág. 188; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México

$i=\{1,2\}$

ρ_i Densidad del fluido en la i -ésima sección transversal dA_i $\frac{kg}{m^3}$

v_i Velocidad promedio del fluido en la i -ésima sección transversal dA_i $\frac{m}{s}$

Si se lo aplica a un conjunto de tubos de corriente limitados por las secciones transversales A_1 y A_2 , de similares características al tubo de corriente anterior entonces se tiene:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (9)$$

Donde:

$i=\{1,2\}$

ρ_i Densidad promedio del fluido en la i -ésima sección transversal A_i $\frac{kg}{m^3}$

V_i Velocidad promedio del fluido en la i -ésima sección transversal A_i $\frac{m}{s}$

Desarrollando la ecuación de la velocidad:

$$V_i = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} v_i dA_i \quad (10)$$

Considerando los caudales Q_i que atraviesan las secciones límite ($i=\{1,2\}$):

$$Q_i = A_i V_i \quad (11)$$

La ecuación de continuidad queda expresada así:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (12)$$

Para las condiciones generales expresadas anteriormente se puede particularizar aún mas la ecuación recordando que el flujo es incompresible, por lo tanto en la entrada y salida sus densidades son las mismas, quedando expresada la relación así:

$$Q_1 = Q_2 \quad (13)$$

1.2.1.2.6 Ecuación de movimiento de Euler

Considerando un flujo estudiado con la ayuda del volumen de control mostrado en la figura siguiente, a manera de diagrama de fuerza, se plantea la segunda ley de Newton:

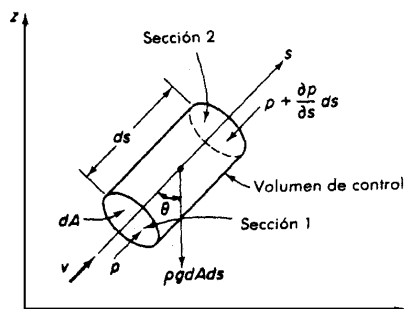


Fig. 1-5. Tubo de corriente infinitesimal de longitud ds .⁸

$$m \frac{dv}{dt} = p dA - \left(p + \frac{\delta p}{\delta s} ds \right) dA - \rho g dA ds \cos \theta \quad (14)$$

$$m = \rho dA ds \quad (15)$$

$$\rho dA ds \frac{dv}{dt} = p dA - \left(p + \frac{\delta p}{\delta s} ds \right) dA - \rho g dA ds \cos \theta \quad (16)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta s} - g \cos \theta \quad (17)$$

Por definición de derivada total:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\delta v}{\delta s} \frac{ds}{dt} + \frac{\delta v}{\delta t} \quad (18)$$

$$\frac{\delta v}{\delta s} \frac{ds}{dt} + \frac{\delta v}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta s} - g \cos \theta \quad (19)$$

En la gráfica se observa que $\cos \theta = \frac{\delta z}{\delta s}$

⁸ OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág. 190; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México

$$v \frac{\delta v}{\delta s} + \frac{\delta v}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta s} - g \frac{\delta z}{\delta s} \quad (20)$$

Incluyendo la condición de flujo estable:

$$v \frac{\delta v}{\delta s} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta s} + g \frac{\delta z}{\delta s} = 0 \quad (21)$$

Conociendo que v, p y z son funciones de s la Ecuación de Euler para flujo estable se escribe como:

$$v \frac{dv}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + g \frac{dz}{ds} = 0 \quad (22)$$

1.2.1.2.7 Ecuación de Bernoulli

Integrando la ecuación de Euler para flujo estable y dividiendo ambos lados para $\gamma = \rho g$ se obtiene la ecuación de Bernoulli que es la más particular y expresa la energía del flujo a través del volumen de control expresado en unidades de longitud, como altura de presión.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{constante} \quad (23)$$

Gráficamente la ecuación se puede interpretar como la conservación de la energía en columnas de agua. Si la energía potencial disminuye, aumentará la energía cinética y la columna de presión hidrostática.

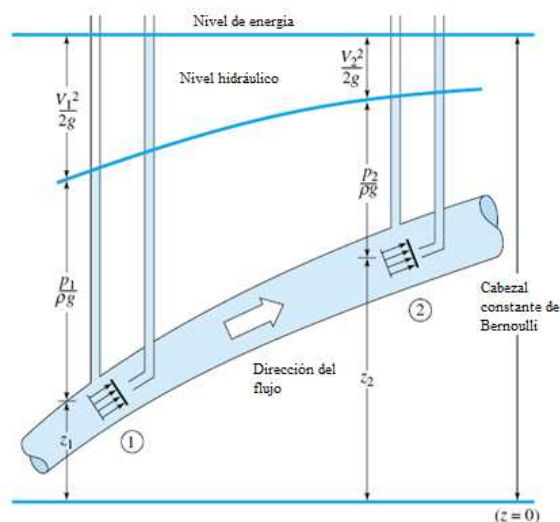


Fig. 1-6. Representación de la ley de la conservación de la energía.⁹

1.2.1.2.8 Flujo a través de un orificio. Primera aproximación a válvulas

Al circular fluido por una tubería a menudo se encuentran con orificios de área menor al área de la sección transversal de la tubería, estas se llaman restricciones y en casos reales pueden ocasionarse por cambio de secciones, accesorios y en especial válvulas. El régimen del flujo al atravesar esta restricción es por lo general turbulento, cuando esto sucede, un chorro con área de sección transversal menor al del orificio se presenta, este se denomina vena contracta, la razón entre estas áreas origina el coeficiente de contracción o C_c :

$$C_c = \frac{A_2}{A_0} \quad (24)$$

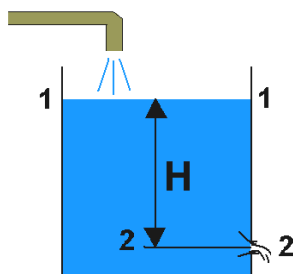


Fig. 1-7. Representación del flujo a través de un orificio. Fuente: propia.

⁹ White, F.; Fluid Mechanics; 4th ed.; WCB – McGraw Hill; 1998; U. S. A

Aplicando las condiciones de aplicación para obtener el balance de energía por la ecuación de Bernoulli se obtiene:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (25)$$

Escribiendo la ecuación de continuidad:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (26)$$

El caudal a fluir por la vena contracta también sufre el efecto de la fricción viscosa, para incluir este fenómeno se escribe la ecuación incluyendo un coeficiente de velocidad C_v de la siguiente manera:

$$Q_2 = C_v v_2 A_2 \quad (27)$$

En este caso se considera un tubo totalmente horizontal y se combinan las ecuaciones anteriores para el volumen de control en estudio:

$$Q_2 = \frac{C_v C_c A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_c^2 A_0^2}{A_1^2}\right)}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} = c A_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \quad (28)$$

$$c = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_c^2 A_0^2}{A_1^2}\right)}} \quad (29)$$

El coeficiente descarga c puede ser experimentalmente determinado. La penúltima ecuación sirve como una primera aproximación matemática del efecto de válvulas en un sistema dinámico hidráulico.¹⁰

1.2.1.3 Modelado matemático

¹⁰ OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág. 192; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México

Las características dinámicas de los sistemas hidráulicos se las puede estudiar y explicar fácilmente a través de las leyes fundamentales del flujo de líquidos.

1.2.1.3.1 Elementos

En este tipo de sistema, los elementos capacitivos están representados por acumuladores o tanques, los elementos inductivos se representan mediante tuberías; mientras que los disipadores se presentan como válvulas.

- *Capacitancia hidráulica.* Cambio en la cantidad de volumen del líquido para producir un cambio unitario en la presión $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ o altura [m].

$$C = \frac{\text{Cambio en la cantidad de líquido}}{\text{Cambio en presión}} \left[\frac{m^3}{N/m^2} \right] \text{ ó } \left[\frac{m^3}{N} \right]$$

O también

$$C = \frac{\text{Cambio en la cantidad de líquido}}{\text{Cambio en la altura}} \left[\frac{m^3}{m} \right] \text{ ó } [m^2]$$

Por facilidad y conveniencia, con un sistema de tanque lleno de líquido, se escoge la altura como una medida del potencial, ya que en este caso, la capacitancia del tanque coincide con el área transversal del tanque; y si esta área es constante, la capacitancia resultante también será constante a pesar de que la altura cambia.

$$C = A_{\text{tanque}}$$

- *Inertancia hidráulica.* Representa el cambio de la presión o altura necesario para producir una aceleración del flujo líquido volumétrico.²

$$I_h = \frac{\text{cambio en presión}}{\text{cambio en la razón de flujo por segundo}} \left[\frac{N/m^2}{m^3/s^2} \right] \text{ ó } \left[\frac{N \cdot s^2}{m^5} \right]$$

O también

$$I_h = \frac{\text{cambio en la altura}}{\text{cambio en la razón de flujo por segundo}} \left[\frac{m}{m^3/s^2} \right] \text{ ó } \left[\frac{s^2}{m^2} \right]$$

- *Resistencia hidráulica.* Cambio en el potencial requerido para producir un cambio unitario en la corriente, razón de flujo o velocidad.²

En el caso de fluidos líquidos en tubos, válvulas o cualquier dispositivo que actúe como reductor del flujo, se puede considerar que el potencial requerido será la presión diferencial (diferencia de presión existente entre la corriente arriba y la corriente abajo respecto al dispositivo reductor) o la altura diferencial.

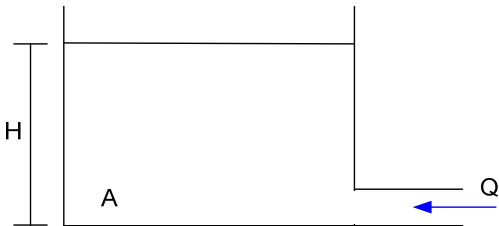
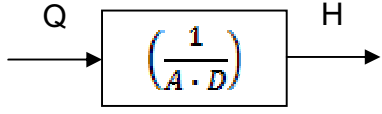
$$R_h = \frac{\text{Cambio en presión diferencial} \left[\frac{N}{m^2} \right]}{\text{Cambio en razón de flujo} \left[\frac{m^3}{s} \right]} \text{ ó } \left[\frac{N \cdot s}{m^5} \right]$$

O también

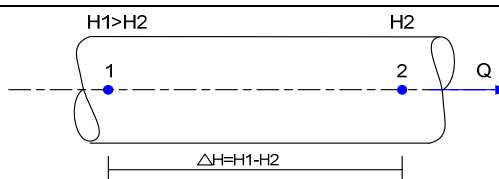
$$R_h = \frac{\text{Cambio en altura diferencial} \left[\frac{m}{m^3/s} \right]}{\text{Cambio en razón de flujo} \left[\frac{m^3}{s} \right]} \text{ ó } \left[\frac{s}{m^2} \right]$$

Esta resistencia hidráulica depende de las condiciones del flujo, es decir, si el flujo es laminar o turbulento.

Tabla 1-1. Resumen de elementos empleados para la modelación matemática de sistemas físicos.

| Acumulador capacitivo | |
|---|--|
|  | |
| MODELADO | DIAGRAMA DE BLOQUE |
| $V^* = A \cdot H \quad (30)$ $DV^* = D(A \cdot H) \quad (31)$ $DV^* = Q \quad (32)$ $Q = A \cdot DH \quad (33)$ $H = \left(\frac{1}{A \cdot D} \right) \cdot Q \quad (34)$ |  |

Acumulador inductivo



At es área transversal de la tubería

$$\sum F = m \cdot a = \Delta p \cdot A_t \quad (35)$$

$$m = \rho \cdot V^* \quad (36)$$

$$a = DV \quad (37)$$

$$\Delta p = \gamma \cdot \Delta H \quad (38)$$

$$\rho \cdot V^* \cdot DV = \gamma \cdot \Delta H \cdot A_t \quad (39)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (40)$$

$$V^* = L \cdot A_t \quad (41)$$

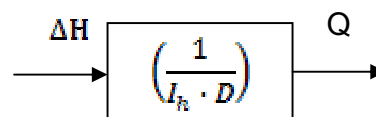
$$V = \frac{Q}{A_t} \quad (42)$$

$$\rho \cdot L \cdot A_t \cdot D \left(\frac{Q}{A_t} \right) = \rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot A_t \quad (43)$$

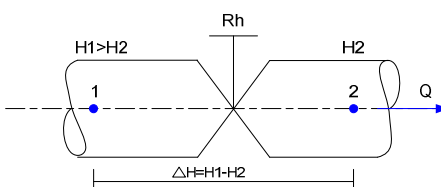
$$\Delta H = \left(\frac{L}{g \cdot A_t} \right) \cdot DQ \quad (44)$$

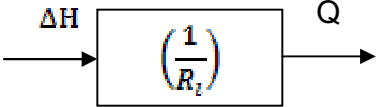
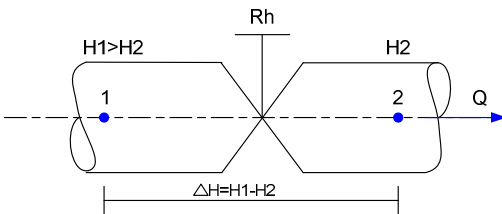
Donde: $I_h = \left(\frac{L}{g \cdot A_t} \right) \quad (45)$

Por lo tanto: $Q = \left(\frac{1}{I_h \cdot D} \right) \Delta H \quad (46)$



Disipador o Resistencia FLUJO LAMINAR



| | |
|--|--|
| <p>La razón de flujo o caudal Q [m^3/s] y la altura diferencial (H_1-H_2) [m] son proporcionales:</p> $Q = k_1(H_1 - H_2) \quad (47)$ <p>Donde k_1 es una constante de proporcionalidad para flujo laminar. Y la resistencia es:</p> $R_1 = \frac{d(H_1 - H_2)}{dQ} = \frac{H_1 - H_2}{Q} = \frac{h}{Q} = \frac{1}{k_1} \quad [s/m^2] \quad (48)$ <p>La resistencia encontrada es constante para flujo laminar.</p> |  |
| <p>Nota: Si se considera que el flujo laminar se da a través de un tubo cilíndrico, la relación entre la altura diferencial y la razón de flujo está dada por la fórmula de Hagen-Poiseuille:</p> $h = \frac{128 \cdot \nu \cdot L}{g \cdot \pi \cdot D^4} \cdot Q \quad (49)$ <p>Donde</p> <p>ν = viscosidad cinemática [m^2/s]</p> <p>L = longitud del tubo [m]</p> <p>D = diámetro del tubo [m]</p> <p>Por lo tanto la resistencia hidráulica para este caso será:</p> $R_1 = \frac{dh}{dQ} = \frac{128 \cdot \nu \cdot L}{g \cdot \pi \cdot D^4} \quad (50)$ | |
| <p>Disipador FLUJO TURBULENTO</p> | |
|  | |

La relación entre la razón de flujo o caudal Q [m^3/s] y la altura diferencial $(H_1 - H_2)$ [m] está dada por:

$$Q = k_t \sqrt{(H_1 - H_2)} \quad (51)$$

Donde k_t es una constante para flujo turbulento.

La resistencia para flujo turbulento no es constante debido a que no es una relación lineal.

$$dQ = \frac{1}{2} \cdot k_t \cdot (H_1 - H_2)^{-1/2} \cdot d(H_1 - H_2) \quad (52)$$

$$\frac{d(H_1 - H_2)}{dQ} = \frac{2}{k_t \cdot (H_1 - H_2)^{-1/2}} \quad (53)$$

Donde:

$$k_t = \frac{Q}{(H_1 - H_2)^{1/2}} \quad (54)$$

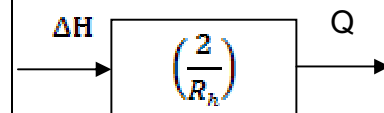
Reemplazando en la ecuación anterior,

$$\frac{d(H_1 - H_2)}{dQ} = \frac{2}{\frac{Q}{(H_1 - H_2)^{1/2}} \cdot (H_1 - H_2)^{-1/2}} \quad (55)$$

$$\frac{d(H_1 - H_2)}{dQ} = 2 \frac{(H_1 - H_2)}{Q} \quad (56)$$

Por lo tanto la resistencia hidráulica es:

$$R_h = \frac{d(H_1 - H_2)}{dQ} = 2 \frac{(H_1 - H_2)}{Q} \quad (57)$$



Tanto la capacitancia como la inercia del flujo tienden a almacenar la energía del fluido debido a la presión en el caso de la capacitancia y al flujo en el caso de la inercia; mientras que la resistencia hidráulica produce pérdidas de energía o disipa esta energía.

1.2.2 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADO

Utiliza un espacio vectorial de dimensión n en el cual un punto describe una trayectoria de una curva que es la evolución del estado de un sistema dinámico determinado, la evolución de las variables internas del sistema. Por lo tanto esta teoría se vale del álgebra lineal y de las herramientas computacionales para su desarrollo, por lo tanto una de las herramientas más apropiadas para su uso es el MatLab®.

1.2.2.1 Ventajas con relación a la teoría clásica.¹¹

- Aplicabilidad a sistemas multivariable en los cuales la relación entre una entrada y 1 salida no se pueden conseguir, en donde existe alto grado de interactividad entre variables
- Aplicable a sistemas con relaciones no lineales entre las variables involucradas
- Aplicable a sistemas cuyas parámetros varíen con el tiempo a velocidades comparables con la evolución del sistema, a las que no, se establecen constantes y se plantea un sistema en ese sentido.
- Permite establecer retroalimentación no solo con las salidas sino con parámetros intermedios del sistema, lo que enriquece el comportamiento del sistema
- Su objetivo puede ser la optimización de los sistemas, reflejándose en costos ahorrados para la empresa.
- Permite plantear sistemas con grados de sus ecuaciones diferenciales mayores a uno y llevarlo a un sistema de ecuaciones ordinarias de primer grado.¹²

¹¹ DOMÍNGUEZ, S.; Control en el espacio de estado; pág. 4; 2^{da} ed.; Pearson Education; 2006; Madrid

¹² WILLIAMS, R.; Linear State-Space Control Systems; pág. 5; 1st ed.; John Wiley & Sons; 2007; U.S.A.

1.2.2.2 Características de los sistemas que se pueden analizar con esta teoría:

- No lineal
- Parámetros no constantes
- Multivariable

1.2.2.3 Definiciones

1.2.2.3.1 Variables de estado

“Mínima cantidad de información necesaria en un instante para que, conociendo la entrada a partir de ese instante, se pueda determinar cualquier variable del sistema en cualquier instante posterior”.⁸

Relacionado con el tratamiento de los sistemas dinámicos con esta teoría se utilizan los siguientes términos con su interpretación dentro del sistema:

- Representación interna=estado del sistema.
- Representación externa=relación entrada-salida.
- El conjunto de variables de estado se las compila en el denominado vector de estado del sistema de dimensión n .

Se utilizan de la teoría clásica de control:

- La causalidad de los sistemas físicos.
- Se centra en los sistemas deterministas (relación unívoca de encontrar una salida a partir de una entrada).

1.2.2.3.2 Espacio de estado

“Espacio vectorial en el cual el valor de estado toma valores, teniendo por tanto las mismas dimensiones que el número de elementos de dicho vector”.¹³

Hablando en términos del álgebra lineal, un espacio de estado:

¹³ DOMÍNGUEZ, S.; Control en el espacio de estado; pág. 7; 2^{da} ed.; Pearson Education; 2006; Madrid

- Admite infinitas bases relacionadas entre sí mediante transformaciones lineales
- Como admite infinitas bases y la representación depende de la base escogida entonces existen infinitas posibilidades de representación, así mismo relacionadas entre sí por transformaciones lineales.
- La representación externa no se ve variada por la representación del estado elegida.

1.2.2.4 Nomenclatura de representación de ecuaciones de espacio de estado

$$\begin{array}{l}
 \text{Vector de estado} \\
 \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\
 \text{Matriz del sistema} \quad \text{Matriz de entrada} \\
 \text{Vector de entrada}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Vector de salida} \\
 y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \\
 \text{Matriz de salida} \quad \text{Matriz de transmisión directa}
 \end{array}$$

Fig. 1-8. Ecuaciones matriciales de estado y salida de un sistema. Fuente: Propia

En donde para mantener la coherencia de las operaciones matriciales algebraicas las matrices anteriores tendrán las siguientes dimensiones:

| Matriz | Nomenclatura | Filas | Columnas | Dimensión |
|--------------------------------|--------------|-------|----------|--------------|
| Vector de estado | $\dot{x}(t)$ | n | 1 | $n \times 1$ |
| Matriz del sistema o de estado | $A(t)$ | n | n | $n \times n$ |
| Matriz de entrada | $B(t)$ | n | m | $n \times m$ |
| Vector de entrada | $u(t)$ | m | 1 | $m \times 1$ |
| Vector de salida | $y(t)$ | p | 1 | $p \times 1$ |
| Matriz de salida | $C(t)$ | p | n | $p \times n$ |
| Matriz de transmisión directa | $D(t)$ | p | m | $p \times m$ |
| Vector variables de estado | $x(t)$ | n | 1 | $n \times 1$ |

Fig. 1-9. Nomenclatura y dimensión de las matrices envueltas en las ecuaciones estado y de salida de un sistema dinámico. Fuente: Propia.

Mencionado lo anterior se observa que el vector de estado no es más que la representación matricial de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer grado¹⁴.

La representación en bloque del sistema es el siguiente:

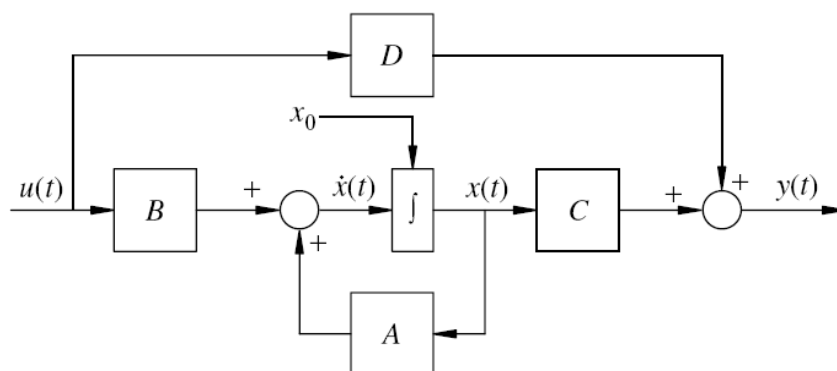


Fig. 1-10. Representación gráfica utilizando el álgebra de bloques para las ecuaciones de estado y de salida de un sistema dinámico.¹¹

¹⁴ WILLIAMS, R.; Linear State-Space Control Systems; pág. 4; 1sted.; John Wiley & Sons; 2007; U.S.A.

1.2.2.4.1 Propiedad de invariancia

Indica la cantidad de invariables o constantes a los coeficientes de las matrices $A(t)$, $B(t)$ y $C(t)$. Esta propiedad debe cumplirse para que la teoría y metodologías de espacio de estado puedan ser utilizadas.

1.2.2.5 Métodos para la determinación del modelo de estado de un sistema

Las ecuaciones de estado y salida pueden ser escritos de diversas maneras, por eso existen diversos métodos que ayudan a decidir o escoger una opción para estas ecuaciones. Para seleccionar un modelo se deben considerar los siguientes criterios:

1. Las ecuaciones de estado incluyen solamente: Variables de estado y sus primeras derivadas.
2. Las ecuaciones de salida incluyen: Variables de estado, variables de entrada y variables de salida.
3. Las variables no deben presentar discontinuidades en el ámbito de estudio propuesto.
4. Las entradas al sistema pueden tener discontinuidades por lo tanto ninguna variable de entrada puede ser utilizada como de estado.

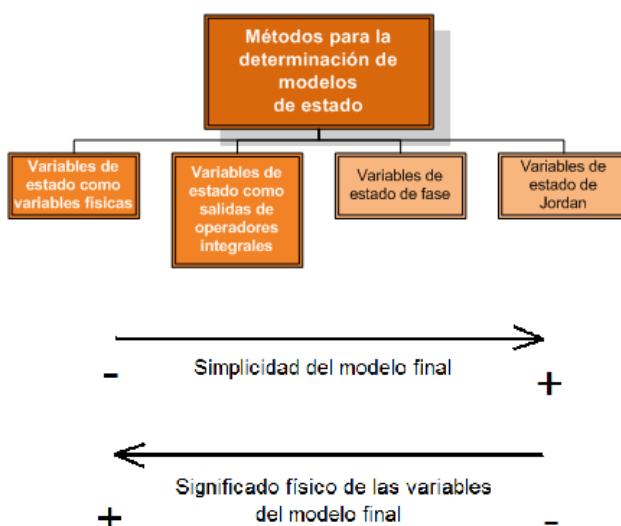


Fig. 1-11. Métodos para la determinación del modelo de estado de un sistema con comparación cualitativa de simplicidad del modelo y significado físico de sus variables. Fuente: Propia.

Como se muestra en la figura 1-11, existen cuatro métodos para la determinación del modelo de estado de un sistema. De izquierda a derecha se complica el grado de las matemáticas para el desarrollo del modelo, sin embargo, el modelo final obtenido es de mayor simplicidad para su resolución y estudio. De derecha a izquierda se incrementa el significado físico de las variables matemáticas envueltas en el sistema. El método segundo (contando de izquierda a derecha) guarda coherencia con la física envuelta en el sistema y simplifica la obtención del modelo, es de amplia utilización. Solo se exponen los métodos de variables físicas y de salidas de operadores integrales a continuación por su aplicabilidad en el sistema a estudiar.

1.2.2.5.1 Método de variables de estado como variables físicas

Está basado en las ecuaciones de acumulación de energía, incluyen la energía potencial y cinética de los elementos. Las variables de estado en este método son elegidas de cada elemento acumulador de energía, estas variables determinan la transmisión de energía entre dichos elementos y sus alrededores que tienen un diferente nivel energético. Este método se asemeja al utilizado en la teoría clásica de la dinámica de sistemas, se lo mejora al introducir el ordenamiento matricial de las variables. Las variables escogidas por cada tipo de sistema se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 1-2. Variables físicas escogidas como variables de estado, dependiendo del tipo de sistema estudiado

| Tipo de sistema | Variables de estado escogidas |
|------------------------|--|
| Eléctrico | Voltaje en condensadores |
| | Intensidad de corriente en bobinas |
| Mecánico | Posición relativa a un cierto nivel predeterminado (energía potencial) |
| | Velocidad de elementos (energía potencial) |
| Hidráulico | Altura de la superficie libre del líquido contenido en un acumulador (energía potencial) |
| Térmico | Temperatura de elementos |

1.2.2.5.2 Método de variables de estado como salida de operadores integrales

Este método es muy versátil, puede ser utilizado tanto para sistemas lineales como no lineales. Utiliza las salidas de operadores integrales sucesivos como variables de estado, los operadores se aplican a aquellas ecuaciones diferenciales que determinan el estado inicial del sistema estudiado. Con esta metodología se logra evitar discontinuidades ya que las salidas de los integrales, en el rango de integración dan como resultado ecuaciones continuas. El método en sí, se puede plantear para sistemas monovariantes y multivariantes.

1.2.2.6 Controlabilidad

Se refiere a la capacidad de un sistema de dimensión n por la cual a partir de cualquier punto inicial o cualquier conjunto de condiciones iniciales, con la imposición de una entrada determinada, es posible llevar a una condición final deseada, en un intervalo de tiempo finito.¹⁵

La implicación más importante de esta capacidad en el estudio de los sistemas dinámicos es la seguridad de que no existirán limitaciones al momento de controlar el sistema (dentro de los límites físicos del mismo). Es útil también cuando se quiere conocer si el planteamiento matemático de un espacio de estado es el correcto y si las entradas o salidas escogidas permitirán en realidad controlar el mismo.

El teorema que permite conocer si el sistema planteado es controlable dice que la ecuación del sistema es controlable si y solo si se cumple que:

$$\text{rango}(P) = \text{rango}[A \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n \quad (58)$$

Siendo A y B las matrices del sistema y entrada de la ecuación del vector de estado, respectivamente, P es la matriz de controlabilidad de dimensión $nx(nm)$ y n es la dimensión de la matriz cuadrada de la matriz del sistema A .¹²

¹⁵ WILLIAMS, R.; Linear State-Space Control Systems; pág.110; 1sted.; John Wiley & Sons; 2007; U.S.A.

1.2.2.7 Observabilidad

Es la capacidad de un sistema de dimensión n por el cual al procesar las medidas de las entradas y salidas del mismo en un intervalo finito de tiempo, a través de la solución de la ecuación del sistema pueden llevar a conocer el estado inicial del sistema y en sí toda la trayectoria seguida por el estado en el espacio del mismo.

El teorema que permite manejar la capacidad de observabilidad en términos de operaciones matriciales dice que un sistema es observable si y solo si:

$$\text{rango}(Q) = \text{rango} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (59)$$

Siendo A y C las matrices del sistema y salida de la ecuación del vector de estado, respectivamente, Q es la matriz de observabilidad de dimensión $(np) \times n$ y n es la dimensión de la matriz cuadrada de la matriz del sistema A .¹⁶

1.3 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control es un conjunto de elementos que actúan sobre otro sistema (de planta) para que este cumpla con sus objetivos determinados o tareas requeridas.

1.3.1 TIPOS DE CONTROL DE PROCESOS

Según la forma de operar el sistema de control se puede clasificar en:

- Control Manual: Cuando un operador humano es el que efectúa el control sobre el sistema.

¹⁶ WILLIAMS, R.; Linear State-Space Control Systems; pág. 151; 1sted.; John Wiley & Sons; 2007; U.S.A.

- Control Semiautomático: Cuando parte del proceso de control es automático y otra parte es manual.
- Control Automático: Cuando no interviene un operador humano, sino son elementos artificiales los que efectúan el control.

Según la forma en que este sistema controla otros sistemas, se clasifica en:

- Control Secuencial. Como su nombre lo indica, este tipo de control establece una secuencia para la ejecución de distintos procesos. Dependiendo del sistema a controlar, esta secuencia puede o no ser cíclica. Son ejemplos de control secuencial: el control de plantas envasadoras, dosificadoras de líquidos, el arranque de quemadores en unidades de generación de vapor (calderas), etc.
- Control de Variables. Este tipo de control actúa sobre que los parámetros de salida de un sistema físico para que converjan con los valores requeridos o de referencia. Son ejemplos de control de variables: el control de la altura de un fluido en un recipiente, del caudal de un líquido, el control de la temperatura a la cual debe llegar un horno de secado de pintura, etc.

En el control de variables se pueden reconocer las siguientes definiciones:

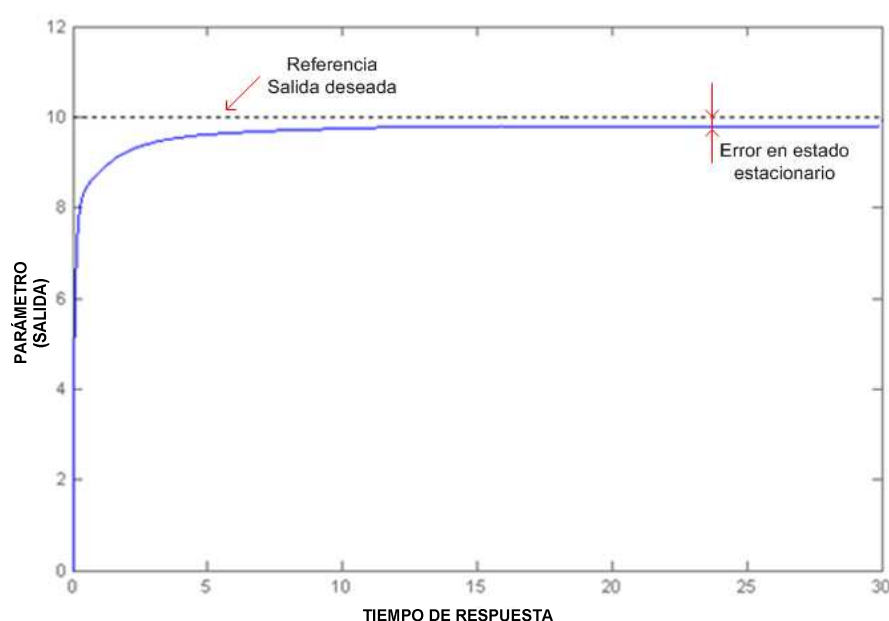


Fig. 1-12. Principales parámetros existentes en un control de variables. Fuente: propia.

Un sistema es “estable” cuando la respuesta del sistema converge con el tiempo al valor de referencia y se mantiene cercana a este valor dentro de un rango de error establecido.

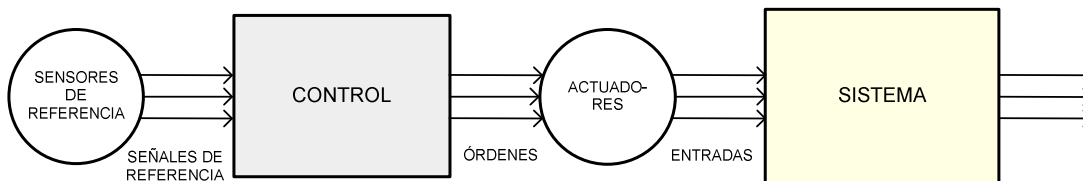
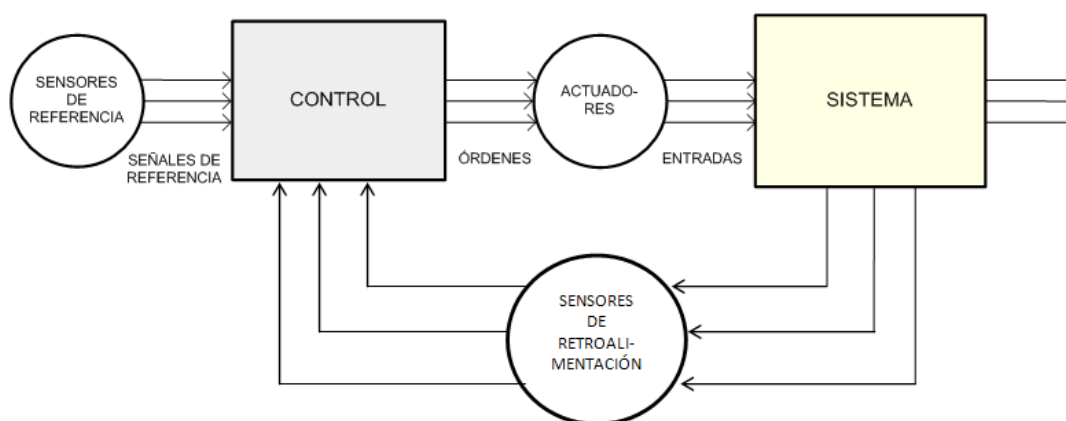
Hay casos en que el sistema no converge, o luego de haberse acercado se aleja nuevamente (a veces cíclicamente), entonces, se dice que el sistema es “*inestable*” y por tanto el control falla.

1.3.2 ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Debido a que el sistema de control es un sistema físico presenta los elementos necesarios para que el sistema de planta (a controlar) pueda cumplir con sus objetivos.

Los elementos principales de un sistema de control son:

- **Sensores:** Son dispositivos cuyas funciones son las siguientes:
 1. Detectar o captar parámetros emitidos por los sistemas de planta.
 2. Enviar esta información al controlador determinado.
- **Controlador:** Este dispositivo funciona como el eje central o cerebro del sistema de control. Sus funciones son:
 1. Almacenar información (ya sea por su programación, o por datos adquiridos constantemente).
 2. Recibir la información proveniente de los sensores.
 3. Procesar esta información.
 4. Enviar órdenes a los actuadores según el análisis de la información recibida para que estos actúen sobre el sistema de planta para que cumpla con sus objetivos. Es decir estas órdenes según la información procesada, provocarán la apertura o cierre de válvulas, encendido o apagado de motores, bombas, etc.
- **Actuadores:** Estos dispositivos cuando reciben órdenes (señales) provenientes del controlador, accionan o actúan sobre el sistema de planta para controlarlo.

Fig. 1-13. Control de lazo abierto.¹⁷Fig. 1-14. Control de lazo cerrado.¹⁷

1.3.2.1 Sensores.

Sensor es un dispositivo o transductor que convierte un tipo de señal o condición física (que se quiere medir) en otro tipo de señal (que facilita su medición), generalmente eléctrica para ser usada por un controlador como por ejemplo un PLC. Los sensores están conectados a la entrada del controlador.

Existen varias características técnicas que definen el funcionamiento de un sensor, entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- Rango de medida. Corresponde al rango entre el límite superior e inferior de la magnitud medida que el sensor puede detectar.

¹⁷ AGUINAGA, A; CRUZ, D; Folleto de Control Automático; E.P.N.

- Alcance o span. Al rango se lo divide en un número determinado de escalas para poder observar valores intermedios. El alcance es la distancia entre el mayor y el menor valor de la escala.
- Desviación de cero (Offset). Representa el valor medido en la variable de salida siempre y cuando la variable de entrada sea nula. (En el caso de que los valores de la variable de entrada no lleguen a cero, se debe establecer otro punto de referencia).
- Linealidad. No todo sensor tiene un comportamiento aproximadamente lineal. Para un análisis matemático, lo mejor para simplificar los cálculos y la modelación, es recomendable linealizar su comportamiento.
- Sensibilidad. Representa la relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada. Es decir nos indica que tan grande y rápida es la variación de la respuesta o salida cuando hay una variación en la entrada.
- Resolución. Representa la mínima variación de la magnitud de la entrada que puede ser captada por la respuesta del sistema o salida.
- Velocidad de respuesta. Representa el tiempo necesario para que luego de aplicada una señal de entrada en el sensor, este produzca la señal de salida correspondiente.
- Repetitividad. Capacidad de obtener la misma respuesta o salida al repetir varias veces la misma medida de la entrada.
- Zona muerta, tiempo muerto. La zona muerta representa un rango de valores de la señal de entrada para los cuales el sensor no es capaz de enviar señales de salida. Mientras que el tiempo muerto es el tiempo que debe transcurrir desde el momento de la llegada de la señal de entrada hasta que el sensor es capaz de responder.
- Error. Corresponde al resultado de la diferencia entre el valor verdadero de la magnitud a medir menos el valor que el sensor logra captar.

- Error por histéresis. Diferencia entre el valor obtenido por un incremento de la magnitud a medir menos el valor obtenido por una reducción de la misma magnitud.

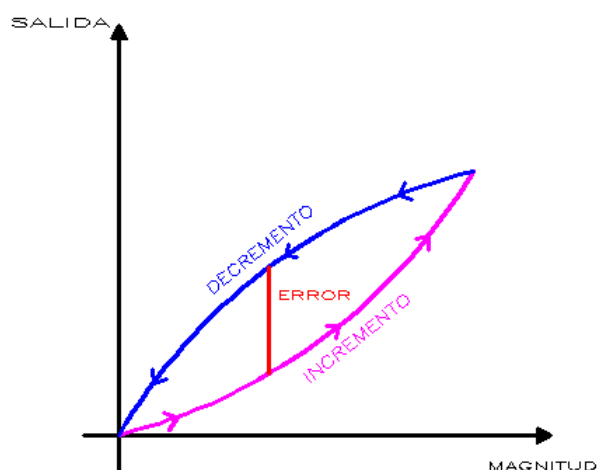


Fig. 1-15. Representación del error por histéresis. Fuente: propia.

- Precisión. Se traduce como el error de medida determinado, o también como el grado de error que se presenta siempre entre el valor medido y el valor real. Depende del tipo de sensor y de la casa fabricante.

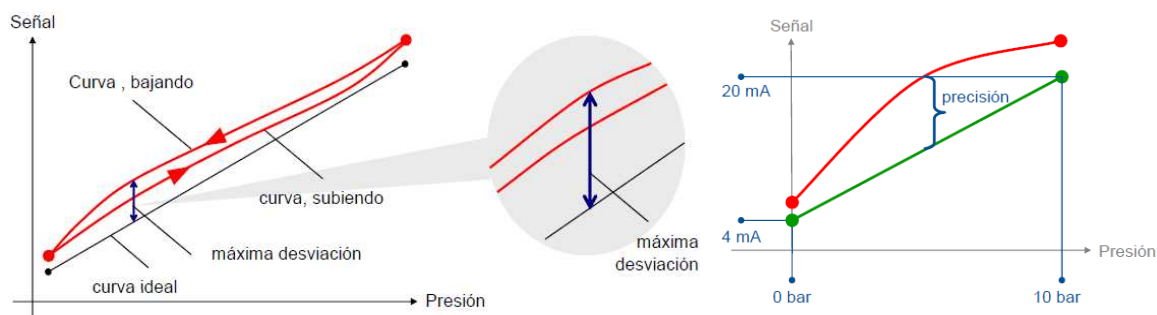


Fig. 1-16. Representación esquemática de la precisión en un sensor mediante la máxima desviación.¹⁸

Generalmente, la señal de salida de los sensores no puede ser leída directamente, sino que se requiere de un controlador o procesador de señales. Existen sensores que debido a su aplicación envían señales que requieren ser amplificadas (y posteriormente acondicionadas con un filtro electrónico), por ejemplo mediante un

¹⁸ <http://atc.ugr.es/jtag2008/ponencias%20II%20jornadas/WIKA.pdf>

puente de Wheatstone o amplificadores operacionales que modifican y adaptan la señal a los niveles apropiados para que el controlador sea capaz de detectarlos. En la siguiente tabla se presenta un listado de los sensores más empleados y comerciales.

Tabla 1-3. Sensores más empleados.¹⁹

| MAGNITUD | SENSOR | TIPO |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Posición lineal o angular | Potenciómetro | Analógico |
| | Encoder | Digital |
| Desplazamiento y deformación | Transformador diferencial | Analógico |
| | Galga extensiométrica | Analógico |
| Velocidad lineal y angular | Dínamo tacométrico | Analógico |
| | Encoder | Digital |
| | Detector inductivo | Digital |
| Aceleración | Acelerómetro | Analógico |
| Fuerza y par (deformación) | Galga extensiométrica | Analógico |
| Presión | Membranas | Analógico |
| | Piezoeléctricos | Analógico |
| Caudal | Turbina | Analógico |
| | Magnético | Analógico |
| Temperatura | Termopar | Analógico |
| | RTD | Analógico |
| | Termistor NTC | Analógico |
| | Termistor PTC | Analógico |
| | Bimetal | Digital (I/O) |
| Sensores de presencia | Inductivos | Digital (I/O) |
| | Capacitivos | Digital (I/O) |
| | Ópticos | Digital (I/O) y Analógico |
| Sensores táctiles | Matriz de contactos | Digital (I/O) |
| | Piel artificial | Analógico |
| Visión artificial | Cámaras de video | Procesamiento digital |
| | Cámaras CCD o CMOS | Procesamiento digital |
| Sensor de proximidad | Sensor final de carrera | |
| | Sensor capacitivo | |
| | Sensor inductivo | |
| | Sensor fotoeléctrico | |
| Sensores de acidez | IsFET | |
| Sensor de luz | fotodiodo | |
| | Fotorresistencia | |
| | Fototransistor | |
| Sensores captura de movimiento | Sensores inerciales | |

¹⁹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>

1.3.2.2 Controlador: PLC - Autómata programable

El controlador lógico programable (PLC), es un dispositivo o equipo electrónico programable cuya función es controlar procesos en tiempo real.

Su característica de ser programable se basa en que puede ser cargado de diferentes programas cuantas veces se requiera, pero cada programa ingresado será borrado automáticamente cada vez que se cargue un nuevo programa, al final el PLC tendrá un solo programa en la memoria.

Un PLC trabaja como una computadora, pero en general no presenta la interfaz de comunicación con las personas como un monitor o una comunicación amigable como en el caso de las computadoras personales.

En general todo PLC presenta los siguientes puertos:

- Puerto para la comunicación con las entradas
- Puerto para la comunicación con las salidas
- Puerto para la comunicación con una computadora, Ethernet y/o con módulos de expansión.

Este controlador recibe las señales provenientes de los sensores o dispositivos de entrada, analiza estas señales según el programa que se le ha cargado en la memoria, ejecuta el programa y envía órdenes a los actuadores según el análisis y procesamiento correspondiente.

Existen muchas marcas de PLCs, entre las más reconocidas se encuentran:

ABB, Allen Bradley (Rockwell), Fuji, Hitachi, Hitech, Mitsubishi, Siemens, Telemecanique (Schneider).

Existen ciertos elementos que dependen de cada casa fabricante e inclusive la nomenclatura en la programación de los elementos de entrada, salida y operaciones internas; pero la base y lógica de programación de todo PLC es la misma.

1.3.2.3 Actuadores

Son dispositivos cuyo objetivo es causar una reacción o efecto sobre un sistema o proceso debido a que son elementos que pueden generar una fuerza a partir de una señal enviada por el controlador del sistema. Es decir tiene la capacidad de transformar una señal del controlador en una acción o efecto físico.

En general los actuadores se pueden clasificar en tres tipos:

- **Hidráulicos.** Son los actuadores más antiguos. Su funcionamiento se basa en la presión que se puede ejercer sobre los líquidos y a su vez en la presión que estos pueden transmitir.
- **Neumáticos.** Funcionan en base a la conversión de la energía del aire comprimido. En general, estos actuadores neumáticos son principalmente cilindros, con lo cual, su principal aplicación se relaciona con movimientos lineales cortos.
- **Eléctricos.** La energía necesaria para su funcionamiento es la electricidad. Por ejemplo: válvulas eléctricas, motores eléctricos (velocidad variable y velocidad fija). En general, los motores eléctricos son los actuadores más adecuados cuando se requieren movimientos angulares y sobre todo son determinantes para el control preciso de la velocidad de ejes.

Frecuentemente, los actuadores hidráulicos son empleados para aplicaciones de gran potencia, mientras que los neumáticos generalmente se los emplea para posicionamientos.

1.3.3 CLASIFICACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO

1.3.3.1 Lazo abierto

Como su nombre lo dice, este tipo de control no lleva a cabo una retroalimentación basada en la información de la respuesta del sistema. Se limita únicamente a dar un valor de referencia y un tipo de señal de entrada determinado. Por estas razones es

muy fácil de implementar, pero se debe tener en cuenta que es aplicable únicamente en sistemas simples en los que además no existen perturbaciones (no causen grandes cambios).

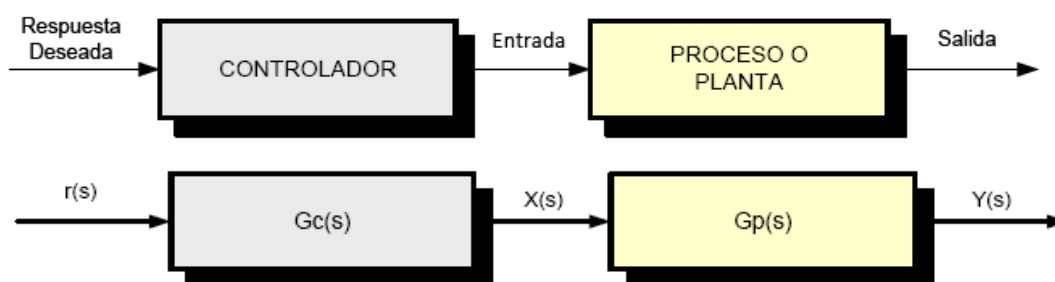


Fig. 1-17. Esquema del funcionamiento de un control automático de lazo abierto.¹⁷

$$H(s) = \frac{Y(s)}{r(s)} = G_P(s) \cdot G_C(s) \quad (60)$$

Donde:

$H(s)$ es la función de transferencia global

$Y(s)$ es la salida del sistema de planta

$r(s)$ es la referencia

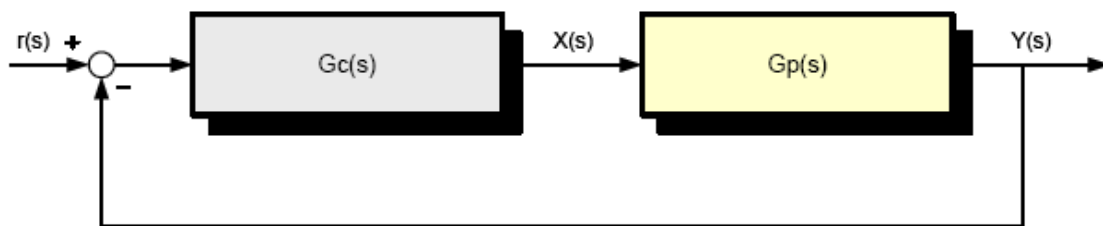
$G_P(s)$ Es la función de transferencia del sistema de planta

$G_C(s)$ Es la función de transferencia del sistema de control

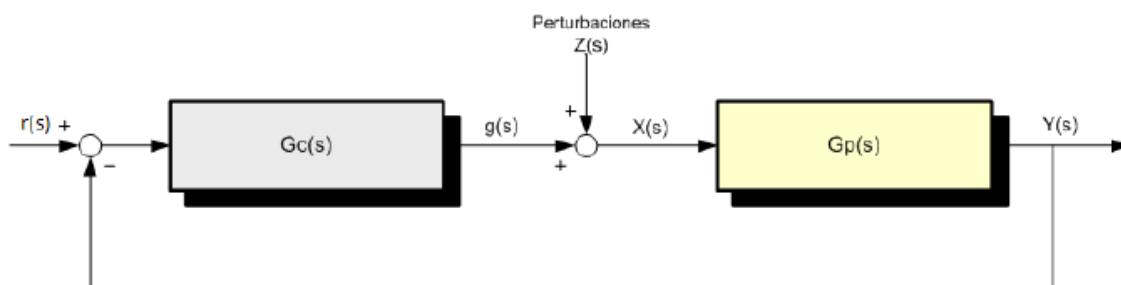
1.3.3.2 Lazo cerrado o retroalimentado

Mediante este tipo de control, el controlador recibe la información de las señales de salida o respuesta del sistema de planta para compararla con cierta información de referencia y tomar las medidas adecuadas para obtener la respuesta deseada.

Puede presentarse con o sin perturbaciones (externas).

Fig. 1-18. Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado sin perturbaciones.¹⁷

$$H(s) = \frac{Y(s)}{r(s)} = \frac{G_p(s) \cdot G_c(s)}{1 + G_p(s) \cdot G_c(s)} \quad (61)$$

Fig. 1-19. Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado con perturbaciones.¹⁷

$$Y(s) = \frac{G_p(s) \cdot G_c(s)}{1 + G_p(s) \cdot G_c(s)} \cdot r(s) + \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s) \cdot G_c(s)} \cdot Z(s) \quad (62)$$

Donde:

$H(s)$ es la función de transferencia global

$Y(s)$ es la salida del sistema de planta

$r(s)$ es la referencia

$G_p(s)$ Es la función de transferencia del sistema de planta

$G_c(s)$ Es la función de transferencia del sistema de control

$Z(s)$ Representa las perturbaciones

- **Acciones de control en lazo cerrado o retroalimentado**

Existen básicamente 4 tipos de acciones de control: todo – nada (on – off), proporcional, derivativo, integral. Estos interactúan unos con otros para crear acciones de control más precisas según lo requiera la aplicación, pero de la suma de estos últimos tres nace la acción de control PID.

Todo – nada. Es la acción más sencilla ya que consiste en un pulsador que generalmente solo prende o apaga un actuador. Es decir permanece en un valor máximo o mínimo dependiendo de la información de retroalimentación.

Proporcional (P). Este tipo de acción de control trata de encontrar el valor de una constante denominada ganancia proporcional, que permite cumplir con el requerimiento del tiempo de subida. Es decir este tipo de control se asemeja a un amplificador (cuya constante puede ser cambiada según el requerimiento).

La relación entre las señales de entrada y salida en el controlador está dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (63)$$

Donde:

$u(t)$ = señal de salida del controlador

$e(t)$ = señal de error

Aplicando Laplace en la función anterior se obtiene la función de transferencia para este tipo de acción de control:

$$G_c(s) = K_p = \frac{U(s)}{r(s) - Y(s)} = \frac{U(s)}{e(s)} \quad (64)$$

Por lo tanto la función de transferencia del control proporcional es igual a la constante: K_p .

Derivativo (D). Gracias al control derivativo es posible controlar los sobrepicos, es decir podemos regular el máximo valor que puede llegar a tener un sobrepico. Este tipo de acción es muy importante ya que si no podemos controlar los sobrepicos

en el funcionamiento de un sistema, estos pueden llegar a provocar rápidamente el colapso del sistema.

En el controlador se tiene:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (65)$$

Donde:

$u(t)$ = señal de salida del controlador

$e(t)$ = señal de error

K_d = constante de acción derivativa

Aplicando Laplace en la ecuación anterior se tiene:

$$U(s) = K_d \cdot s \cdot E(s) \quad (66)$$

La función de transferencia del controlador derivativo es:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot s \quad (67)$$

Integral (I). Mediante este control, es posible reducir el error en estado estacionario al introducir en la acción de control una constante K_i .

Este tipo de control es integral, ya que el valor de la salida del controlador varía en relación proporcional con la señal del error.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \quad (68)$$

Donde:

$u(t)$ = señal de salida del controlador

$e(t)$ = señal de error

K_i es la constante a sintonizar

Si despejamos la $u(t)$ de la ecuación anterior, obtenemos:

$$du(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (69)$$

Si aplicamos la transformada de Laplace en la anterior ecuación, tenemos:

$$U(s) = \frac{K_i}{s} \cdot E(s) \quad (70)$$

La función de transferencia resultante para una acción integral es:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (71)$$

Proporcional / Integral. Mediante este tipo de control es posible controlar al mismo tiempo el tiempo de subida y obtener un mínimo error.

Este tipo de acción está definido por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (72)$$

$$U(s) = K_p \cdot E(s) + \frac{K_p}{T_i s} \cdot E(s) \quad (73)$$

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \cdot E(s) \quad (74)$$

Donde: $\left(\frac{K_p}{T_i} \right) = K_i$ (75)

Por lo tanto la función de transferencia para una acción proporcional/integral queda definida por:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (76)$$

Proporcional / Derivativo. Con este tipo de control se puede controlar tanto el tiempo de subida como los sobrepicos.

Este tipo de acción se encuentra definida por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (77)$$

$$U(s) = K_p \cdot E(s) + K_p \cdot T_d \cdot s \cdot E(s) \quad (78)$$

$$U(s) = K_p \cdot (1 + T_d \cdot s) \cdot E(s) \quad (79)$$

Donde: $(K_p \cdot T_d) = K_d$ (80)

Y la función de transferencia es:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P(1 + T_d \cdot s) \quad (81)$$

PID. Como su nombre lo dice, este tipo de control combina las acciones: proporcional, integral y derivativa; por lo tanto puede controlar el tiempo de subida, sobrepicos y error al mismo tiempo, siempre y cuando se logren sintonizar adecuadamente las constantes: K_p , K_i , K_d .

El tipo de acción PID más empleada es PID en paralelo (cada acción de control es independiente), cuya expresión matemática es la siguiente:

$$u(t) = e(t) \cdot K_p + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (82)$$

1.3.4 GUÍA DE MATLAB PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS DINÁMICOS Y DE CONTROL

La necesidad de lidiar con problemas matemáticos llevó en antaño al aparecimiento de herramientas como las matrices, sin embargo estas no tuvieron su real desputo y auge de uso aplicabilidad hasta que apareció el computador que hizo posible manejar grandes cantidades de datos y operaciones en poco tiempo. El desarrollo de los programas computacionales tienen su exponente comercial más difundido con el MatLab® (que viene de los vocablos ingleses **Matrix** y **Laboratory**) que nos indica que su inicio y fundamento básico es el uso de las matrices.

Este poderoso programa utiliza matrices y sus conceptos, algoritmos matemáticos basados métodos numéricos para manejar problemas algebraicos, cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales, series numéricas, entre otras. Permite administrar gráficos de funciones y otros.

Posibilita compilar funciones existentes de la librería del programa y crear otras a manera de subrutinas de programación con los archivos .m (M-files). Puede, con lenguaje propio pero sencillo de programación (lazos de programación básicos), ayudar a crear estos archivos que pueden ser llamados desde el entorno de trabajo de MatLab y ser usadas como si fueran propias de este.

Posee módulos como el Simulink que permiten manejar desde la perspectiva del álgebra de bloques y los sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, el estudio de la dinámica de estos sistemas, sus respuestas, su comportamiento y simular su accionar en un entorno fácil para el usuario y confiable en sus resultados, con lo que se consigue ahorrar tiempo por lo tanto ayuda a acortar los períodos de diseño de sistemas de control, por ejemplo.

Presenta, entre otras funciones, la opción de realizar interfaces gráficas para hacerle fácil el acceso a las funciones desarrolladas para los usuarios con los denominados GUI (Graphic User Interface).

El entorno de MatLab

MatLab tiene en su pantalla principal, tanto en la versión estudiantil como en la profesional, cuatro secciones bien definidas:

1. Ventana de comandos (command window). Es una ventana que guarda los datos trabajados por el usuario en una determinada sesión, no los comandos. Tiene el incitador (prompt) indicado por el símbolo ">>" o "EDU>>" que indica la posibilidad al usuario de ingresar comandos o datos a la ventana.
2. Directorio actual (Current directory). Indica la locación de memoria en donde se aloja el archivo de trabajo actual. Si no se indica una locación diferente por el usuario se mostrará la localización del archivo indicado por defecto en el proceso de instalación.
3. Área de trabajo (Workspace). Mantiene un registro en forma de tabla o matriz de las variables manejadas por el usuario en una determinada sesión, se indica el nombre de la variable, el valor numérico, el tamaño en notación de matriz, el tamaño en memoria de computador y la clase.
4. Historia de comandos (Command history). Guarda los comandos escritos por el usuario en el orden ingresado por el mismo en una determinada sesión.

Además cuando sea requerido por una acción iniciada por el usuario, automáticamente se abrirán ventanas adicionales de trabajo:

- Edición (Editing). Permite editar los archivos escribir y editar una serie de comandos que se grabarán como archivo M.
- Documento (Document). Permite editar los datos de los arreglos matriciales en un entorno de hoja de cálculo.
- Gráficos (Graphics). Se lanza automáticamente al ejecutar una función de gráfico y hace posible visualizar y editar ciertas características del gráfico solicitado.

En el tema del manejo de datos para el estudio de sistemas dinámicos y de control se van a utilizar las funciones indicadas en la siguiente tabla, en donde se indica una breve descripción de las mismas, la sintaxis utilizada en el estudio del sistema dinámico de este proyecto de titulación y alguna nota si es necesario.

Tabla 1-4. Tabla de las funciones que se suelen emplear en el estudio de sistemas dinámicos y de control.

Fuente: propia

| Función | Sintaxis | Descripción | Nota |
|----------------|-----------------|---|---|
| ss | ss(A,B,C,D) | Sirve para especificar un modelo de un sistema en espacio de estado o convierte modelos LTI (Linear Time Invariant, Lineales invariables en el tiempo) en espacio de estado | A, B, C y D son las matrices del sistema |
| tf | tf(sys) | Crea o convierte a modelo de función de transferencia | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| zpk | zpk(sys) | Crea o convierte a modelo de cero-polo-ganancia (zero-pole-gain) | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| ctrb | ctrb(sys) | Encuentra la matriz de controlabilidad de un sistema propuesto | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| obsv | obsv(sys) | Encuentra la matriz de observabilidad de un sistema propuesto | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| rank | rank(X) | Encuentra un estimado del número de columnas y filas linealmente independientes | X es una matriz |

| | | | |
|----------|---------------|---|---|
| | | de una matriz completa | |
| size | size(X,dim) | Encuentra la dimensión de una matriz especificada por el escalar dim | X es una matriz |
| isstable | isstable(sys) | Comprueba si el sistema propuesto es estable | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| minreal | minreal(sys) | Elimina los estados incontrolables o inobservables del sistema de espacio de estado propuesto, el resultado es de orden menor pero posee las mismas características de respuesta del modelo original del sistema | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |
| poly | poly(Y) | Encuentra los coeficientes del polinomio característico de la matriz cuadrada propuesta. La respuesta es devuelta a manera de un vector en donde los coeficientes están ordenados de manera descendente según su exponente. | Y es una matriz cuadrada |
| roots | roots(p) | Encuentra las raíces del polinomio característico propuesto. Devuelve la respuesta como n vector columna cuyos elementos son las raíces. | p es un polinomio de grado n |
| damp | damp(sys) | Encuentra los factores de amortiguamiento y las frecuencias naturales de un sistema de los polos de un sistema LTI propuesto | sys representa una variable que contiene las matrices de estado |

1.3.5 ESTUDIO DE LA NORMA IEC1131

Fue desarrollada por la Comisión Internacional de Electrotecnia (International Electrotechnical Commission), para la cual colaboraron varios técnicos pertenecientes a distintas casas fabricantes.

Esta norma nació con el objetivo de normalizar el empleo y programación de los PLCs ya que anteriormente cada fabricante implantaba sus propias normas y como consecuencia directa el empleo de estos controladores no resultaba flexible, y dependiendo del fabricante, la conexión resultaba con mayor o menor grado de complejidad; pero sobre todo, no existían normas que den solución a los problemas en el campo de control industrial.

A pesar de que todavía persisten fabricantes que tratan de implantar sus propias reglas tanto en programación como en conexionado, la norma IEC1131 ha sido reconocida como el primer paso para la estandarización tanto de los controladores lógicos programables como de los dispositivos periféricos; con lo cual también se incluyen los lenguajes de programación. Es así que esta norma se encuentra dividida en 5 partes:

1. IEC 1131-1: Vista general.
2. IEC 1131-2: Hardware.
3. IEC 1131-3: Lenguaje de programación.
4. IEC 1131-4: Guías de usuario.
5. IEC 1131-5: Comunicación.

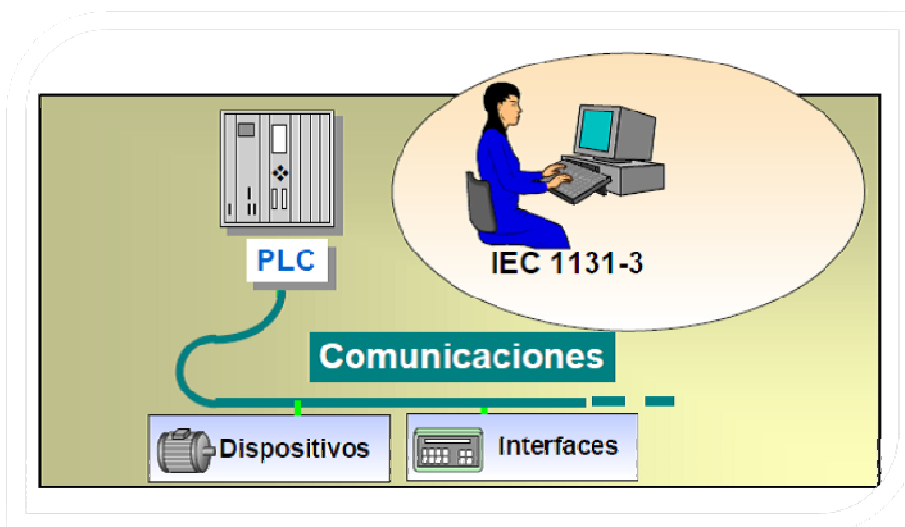


Fig. 1-20. Representación del alcance de la norma IEC1131.²⁰

A continuación se detallan ciertos puntos de la tercera parte de la norma (IEC1131-3) ya que esta contiene los estándares para la programación:

Se divide en 2 partes:

- Elementos comunes.
- Lenguajes de programación.

Los elementos comunes están constituidos por:

- **Tipos de datos.** Para prevenir algunos errores, se han clasificado los datos según su tipo de formato. Los tipos de datos más comunes son: número entero, número real, byte, palabra, doble palabra, fechas, horas, entre otros.
- **Variables.** Permiten la identificación de los valores actuales de los correspondientes datos. Estos valores pueden cambiar ya que los datos se encuentran asociados a entradas, salidas o memorias internas; los cuales constantemente pueden estar cambiando de estado.
- **Configuración, recursos y tareas.** Se puede entender como configuración al software necesario para el control. Se entiende como recurso

²⁰ <http://www.internet.ve/asic/iec1131-3.html>

al procesador capaz de ejecutar los programas IEC. A un recurso se le puede asignar una o más tareas. Cada tarea controla la ejecución de las líneas de programación. Un programa es un conjunto de funciones y bloques funcionales que interactúan entre sí con el objetivo de intercambiar datos.

- **Unidades de organización de programa.** Existen 3 clases de unidades de organización de programas, estos son: las funciones, los bloques funcionales y los programas.

Existen 2 clases de funciones: estándar y definidas por el usuario. Las funciones estándar vienen definidas por el propio software como: ADD, SUB. Mientras que las definidas por el usuario se las debe crear e implementar.

Los bloques funcionales representan funciones especializadas de control, tales como instrucciones, memoria de valores de variables. Cada bloque funcional presenta su interfaz o representación gráfica de entradas, salidas y un código interno propio, un ejemplo típico es el bloque PID.

Los programas son un conjunto de elementos, bloques funcionales y funciones que son ordenados de manera lógica y secuencial para cumplir con un objetivo determinado de control.

Existen cuatro tipos de *lenguajes de programación* normalizados (su sintaxis y semántica han sido determinados y no se permite modificarlos).

Dentro de estos cuatro tipos de lenguajes, existen dos que son de tipo gráfico y dos de tipo literal.

Tabla 1-5. Resumen de los tipos de lenguaje de programación para PLCs. Fuente: propia.

| Tipo | Nombre | Siglas |
|-------------|---|---------------|
| Gráfico | Diagrama de contactos Diagram Ladder | LD |
| | Diagrama de bloques funcionales Function Block Diagram | FBD |
| Literal | Lista de instrucciones Instruction List | IL |
| | Texto estructurado Structured Text | ST |

Diagrama de contactos (LD).

Este tipo de lenguaje es conocido también como lógica de escalera. Es el tipo de lenguaje de programación más empleado.

Es el tipo de lenguaje de programación de PLCs más antiguo y el que más se asemeja a circuitos eléctricos.

Inicialmente su funcionamiento se basaba en que las instrucciones o comandos se hacían efectivos (se energizaban las líneas de programación) mediante la activación de relés. Posteriormente los relés fueron reemplazados por puertas lógicas o circuitos lógicos.

Mediante este tipo de lenguaje se ha logrado reducir el tiempo empleado para el entrenamiento de los usuarios, así como también para la creación de programas tanto sencillos como complejos.

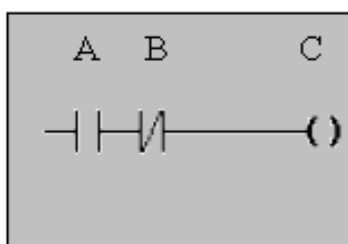


Fig. 1-21. Ejemplo de instrucción en lenguaje LD.²¹

Diagrama de bloques funcionales (FBD).

Este tipo de lenguaje se basa en el empleo de bloques que tienen conexiones internas entre sus entradas y salidas, y su presentación o esquema se asemeja a un circuito eléctrico. (Presenta un código interno oculto).

²¹ <http://www.isa.uniovi.es/genia/spanish/inv/iec1131.htm>

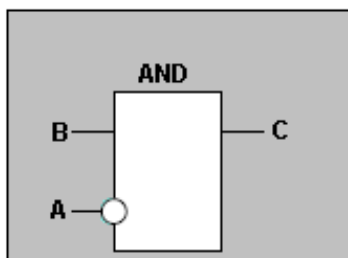
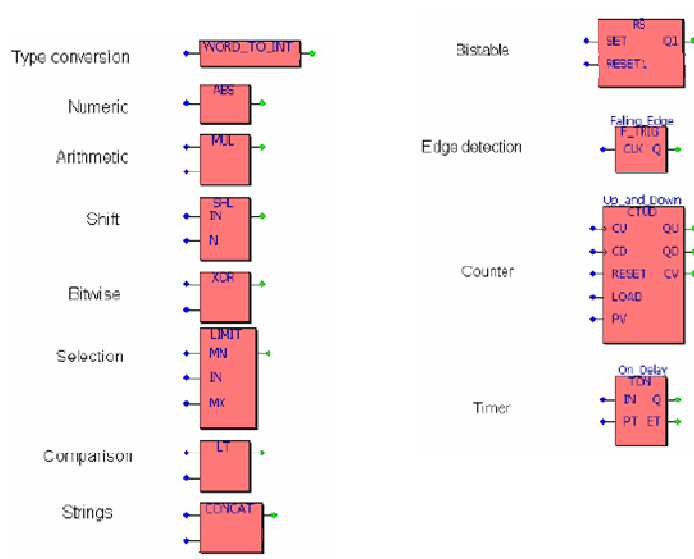


Fig. 1-22. Ejemplo de instrucción en lenguaje FBD.

Fig. 1-23. Algunas instrucciones empleadas en el lenguaje FBD.¹⁶

Lista de instrucciones (IL).

Este tipo de lenguaje se asemeja al lenguaje ensamblador, por lo que presenta un número reducido de instrucciones. Debido a sus limitadas características, se emplea este tipo de lenguaje para pequeñas aplicaciones.

```
LD    A
ANDN B
ST    C
```

Fig. 1-24. Ejemplo de instrucciones en lenguaje IL.¹⁶

| | | | |
|--------|---|-----|----------------|
| LD | Set current result equal to operand | ADD | Addition |
| ST | Store current result to operand location | SUB | Subtraction |
| S | Set Boolean operand to 1 | MUL | Multiplication |
| R | Reset Boolean operand to 0 | DIV | Division |
| JMP | Jump to label | GT | Comparison: > |
| CAL | Call function block | GE | Comparison: >= |
| RET | Return from called function or function block | EQ | Comparison: = |
| &, AND | Boolean AND | NE | Comparison: <> |
| OR | Boolean OR | LE | Comparison: <= |
| XOR | Boolean exclusive OR | LT | Comparison: < |

Fig. 1-25. Semántica y operadores empleados en lenguaje IL.¹⁶

Texto estructurado (ST).

Este tipo de lenguaje facilita la programación de procesos que presentan instrucciones extensas y complejas además de cálculos grandes. Es decir es un tipo de lenguaje más estructurado, complejo y de alto nivel.

```
C=A AND NOT B
```

Fig. 1-26. Ejemplo de instrucciones en lenguaje ST.¹⁶

| Symbol | Operation |
|---------------------------|---------------------|
| (expression) | Parenthesization |
| identifier(argument list) | Function evaluation |
| Examples: | |
| LN(A), MAX(X,Y), etc. | |
| ** | Exponentiation |
| - | Negation |
| NOT | Complement |

| | |
|--------------|------------|
| * | Multiply |
| / | Divide |
| MOD | Modulo |
| + | Add |
| - | Subtract |
| <, >, <=, >= | Comparison |
| = | Equality |
| <> | Inequality |

| | |
|--------|---------------------|
| &, AND | Boolean AND |
| OR | Boolean OR |
| XOR | Boolean xclusive OR |

| | |
|--|------------|
| A := B; | asignación |
| Datatype to Datatype | |
| INT to INT | |
| or | |
| Analog_Channel_Configuration to Analog_Channel_Configuration | |
| CV := CV+1; | |
| C := SIN(X); | |

| |
|--------------------|
| IF .. THEN .. ELSE |
| CASE |
| FOR |
| WHILE ... |
| REPEAT UNTIL |

Fig. 1-27. Operadores empleados en el lenguaje ST.¹⁶

Entre las principales ventajas que presenta el empleo de esta norma se encuentran:

- Reducción del tiempo y esfuerzo que el usuario debe emplear para su entrenamiento y dominio en la programación (ya que el lenguaje de programación no cambia si la marca del controlador programable cambia).
- Reducción del número de recursos humanos, mantenimiento y consultoría.
- Aumento en la flexibilidad para la interconexión entre sistemas de distintas casas fabricantes.
- Aumento en la combinación y colaboración entre elementos provenientes de distintos fabricantes.

CAPÍTULO 2

2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

2.1 DISEÑO DEL MÓDULO

2.1.1 ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

Tabla 2-1. Tabla de especificaciones del módulo didáctico

| Empresa cliente: Escuela Politécnica Nacional | | Producto: Módulo didáctico de un control hidráulico de nivel empleando un autómatas programable. | Fecha inicial: 01/09/2008 |
|--|------------------|--|--------------------------------|
| Diseño: Cruz Daniela Proaño Juan Sebastián | | | Última revisión: 24/02/2009 |
| Especificaciones | | | |
| Concepto | R/D | Descripción | |
| Función | R R | Control PID de nivel de tanques mediante un PLC. Movilidad del módulo didáctico para su fácil transporte. | |
| Dimensiones | R R D | Tanques: <ul style="list-style-type: none"> • Altura:420 mm • Diámetro: 34 mm Estructura de soporte: <ul style="list-style-type: none"> • Altura: 1350 mm • Ancho: 1000 mm • Profundidad:400 mm Caudal de referencia: 0.063 lt/s (1 gal/min) | |
| Señal y control | R R R R | Caudalímetro. Sensores de nivel tipo flotador. Válvulas de control PLC | |
| Energía | R R R | En el lugar de funcionamiento la energía eléctrica disponible corresponde a 110 VAC y 220 VAC. PLC: Entrada 24 VDC, Salida 24 VDC. Debido a normas de seguridad, el voltaje máximo que se puede utilizar en aplicaciones que emplean agua es 12 VDC. | |

| | | |
|---------------------------|---|--|
| Materiales | <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> | <p>Tanques:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transparencia, facilidad de limpieza, facilidad de modificación mecánica del material, resistencia a la corrosión por contacto con agua. <p>Estructura de soporte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suficiente capacidad para soportar los esfuerzos generados por las cargas sobre esta. • Resistencia a la corrosión por contacto con agua. <p>Sensores de nivel tipo flotador:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la corrosión por contacto con agua. • Capacidad de trabajo frecuente. <p>Tubería y accesorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bajo peso. • Alta resistencia a la corrosión por contacto con agua. <p>Válvulas de control:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de uso frecuente. • Alta resistencia a la corrosión por contacto con agua. • Capacidad de regulación de flujo o estrangulación. |
| Vida útil y mantenimiento | <p>R</p> <p>D</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Su limpieza se debe llevar a cabo con solventes orgánicos y suaves para el medio ambiente. • Procedimiento de mantenimiento no muy extenso, ni muy frecuente. |
| Seguridad y Ergonomía | <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los pulsadores: master on y master off (parada de emergencia), deben estar fácilmente al alcance de los usuarios. • Debido a la movilidad del módulo, es necesaria la existencia de seguros que lo inmovilicen en el momento de trabajo. • Todos los circuitos electrónicos y eléctricos deben presentarse con su respectiva caja de protección para evitar cualquier accidente por contacto con agua. |

2.1.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Antes de realizar la selección de los elementos necesarios para la construcción del módulo didáctico, es necesario presentar un listado de materiales o elementos que se tomarán del Laboratorio de Automatización para el desarrollo de esta tesis.

Tabla 2-2. Listado de materiales procedentes del Laboratorio de Automatización Industrial

| No | Item | Características de placa | Marca/Modelo | Número de serie | Cantidad | Estado | Observaciones |
|----|-------------------------------|---|---------------------------|------------------|----------|---------|--|
| 1 | Sensor de nivel tipo flotador | nd | nd/nd | nd | 3 | Regular | Presencia de óxido en las partes de acero sin protección: base y tornillo de regulación del brazo. |
| 2 | Electroválvula | V=110 V; P=10 W; f=50 - 60 Hz | Ind. Bras./nd | S0B001G1 | 2 | Dañado | Se ha comprobado que se encuentra dañada. |
| 3 | Electroválvula | V=110 V; f=50 - 60 Hz; N9 | Joe BDA/nd | nd | 1 | Dañado | Se ha verificado su mal funcionamiento. |
| 4 | Electroválvula | nd | nd/nd | 7L111P3 27 1SHF7 | 1 | Dañado | Se ha comprobado que se encuentra dañada. |
| 5 | Medidor de caudal | nd | MacMillan Co./101 Flo-Sen | 4647-7 | 2 | Regular | Se ha comprobado que se encuentra dañado. |
| 6 | Tanque transparente | h= 420mm; d= 335mm; e= 4mm Policarbonato | nd/nd | nd | 3 | Bueno | Solo necesitan limpieza |
| 7 | Tablero de control | Terminales y conexiones eléctricas varias | nd/nd | nd | 1 | Bueno | |
| 8 | Tablero de alimentación | Terminales y conexiones eléctricas varias | nd/nd | nd | 1 | Regular | Necesita limpieza, reparación o reemplazo de acrílico fisurado. |

| | | | | | | | |
|----|----------------------------|--|-------|----|---|---------|---|
| 9 | Mangueras y acc. de acople | Mangueras y acc. Distintos diámetros | nd/nd | nd | 1 | Regular | Algunas secciones de las mangueras se encuentran dañadas y presentan acumulación de óxido. |
| 10 | Conexiones eléctricas | Alambre flexible varios calibres | nd/nd | nd | 1 | Bueno | No se observan fallas en el aislante ni quemaduras, la continuidad del cable no se ha confirmado. |
| 11 | Bastidor de madera | Estructura de madera para soporte de instrumento | nd/nd | nd | 1 | Regular | La fórmica se encuentra deteriorada en ciertos sectores, la estabilidad del bastidor es buena, necesita limpieza y cambio estético. |

Los elementos que se tomarán en cuenta debido a su buen estado y adaptabilidad con este módulo didáctico son:

- 3 sensores de nivel tipo flotador
- 3 tanques transparentes

Todos estos elementos fueron sometidos a procedimientos de limpieza, pulido y en el caso de los sensores de nivel al final fueron cubiertos por una capa de esmalte anticorrosivo: Glidden (para acabados domésticos, industriales y de mantenimiento).

2.1.3 SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura de soporte se eligió tomando en cuenta el siguiente listado de criterios:

- **Peso.** La estructura y su contenido deben ser lo suficientemente liviano para poder ser transportado al ser empujado por una persona y además no debe dañar las superficies de rodamiento de aglomerado de madera. Mientras más liviana la opción obtendrá mayor puntaje.
- **Resistencia a la corrosión por contacto con agua.** Al ser un módulo didáctico cuyo fluido principal de trabajo es el agua, sus superficies deben ser lo suficientemente resistentes al contacto con agua, no debe degradarse, debe ser impermeable ante esta y debe permitir su limpieza con agua y solventes suaves. Se otorga la mayor calificación al que presente mayor resistencia a la corrosión.
- **Mantenimiento.** Debe poder ser de una superficie que permita la fácil remoción de acumulaciones de polvo, grasa y agua. El mayor puntaje se entrega al que cumpla con todas las características mencionadas en este párrafo.
- **Resistencia mecánica del material.** Debe tener buena resistencia a los esfuerzos que se generan al cargar el material con la cantidad de agua de seguridad. La evaluación de este criterio se hace en base a las tablas comparativas de materiales que se encuentran en el anexo X.
- **Costo.** El costo debe ser el mínimo.
- **Volumen ocupado por el módulo dentro del laboratorio.** Esto es importante ya que el LAIPM tiene un espacio limitado para módulos didácticos el volumen del módulo debe ser lo más reducido posible.
- **Movilidad.** Debe poseer elementos que permitan se transporte con facilidad sin esfuerzo mayor.

2.1.3.1 Descripción de los candidatos

2.1.3.1.1 Opción 1. Mueble de madera disponible en el laboratorio

Material: Aglomerado de madera (Tabla triplex) e= 20mm incluye recubrimiento de fórmica.

Dimensiones principales: Altura= 146 mm, Ancho= 97 mm, Profundidad= 85 mm.

Observaciones: Estado regular. Realizar adecuaciones o modificaciones no sería muy costoso. Posee ruedas en mal estado que presumiblemente fueron escogidas sin considerar el peso del módulo didáctico. Posee dos niveles de trabajo.

2.1.3.1.2 Opción 2. Mueble de madera de cuatro niveles de trabajo

Material: Material: Aglomerado de madera (Tabla triplex) e= 18mm incluye recubrimiento de laca.

Accesorios: Ruedas de caucho con dos grados de libertad y seguro tipo freno de contacto.

Observaciones el costo de realización es importante pero se tiene gran flexibilidad de modificación en el diseño.

2.1.3.1.3 Opción 3. Mueble de madera con perfilería en acero A36

Material: Aglomerado de madera (Tabla triplex) e= 18mm incluye recubrimiento de pintura tipo esmalte. Perfiles metálicos tipo L con perforaciones que permiten montaje con tornillería o pernos y tuercas.

Accesorios: Ruedas de caucho con dos grados de libertad y seguro tipo freno de contacto.

Tabla 2-3. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la estructura soporte. Fuente: Propia

Evaluación de criterios

5>1>2>3>4>6>7

| | Peso | Resistencia a la corrosión por contacto con agua | Mantenimiento | Resistencia mecánica del material | Costo | Volumen ocupado por el módulo | Movilidad | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|--|------|--|---------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------|-----------|---------------|-----------|
| Peso | | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 | 0,185 |
| Resistencia a la corrosión por contacto con agua | 0 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 7 | 10 | 0,370 |
| Mantenimiento | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0,111 |
| Resistencia mecánica del material | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 2 | 0,074 |
| Costo | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 6 | 0,222 |
| Volumen ocupado por el módulo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 1 | 0,037 |
| Movilidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | | | | | 27 | 1 |

Tabla 2-4. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes). Fuente: Propia

| Conclusión | Peso | Resistencia a la corrosión por contacto con agua | Mantenimiento | Resistencia mecánica del material | Costo | Volumen ocupado por el módulo | Movilidad | Sumatorio | Prioridad |
|------------|-------|--|---------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Opción 1 | 0,000 | 0,000 | 0,037 | 0,012 | 0,148 | 0,000 | 0,000 | 0,198 | 3 |
| Opción 2 | 0,123 | 0,247 | 0,074 | 0,012 | 0,000 | 0,019 | 0,000 | 0,475 | 1 |
| Opción 3 | 0,062 | 0,123 | 0,000 | 0,049 | 0,074 | 0,019 | 0,000 | 0,327 | 2 |

Tabla 2-5. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Peso. Fuente: Propia

| Peso | 2>3>1 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 2 | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 3 | 1 | 0 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-6. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia a la corrosión por contacto con agua.

Fuente: Propia

Resistencia a la corrosión
por contacto con agua

| | 2>3>1 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 2 | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 3 | 1 | 0 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-7. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento. Fuente: Propia

Mantenimiento

| | 2>1>3 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 1 | 1 | 0,333 |
| Opción 2 | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 3 | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-8. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia mecánica del material. Fuente: Propia

Resistencia mecánica del material 3>1=2

| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | | 0,5 | | |
| Opción 2 | 0,5 | | 0 | 0,5 | 0,167 |
| Opción 3 | 1 | 1 | | 2 | 0,667 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-9. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo. Fuente: Propia

| Costo | 1>3>2 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 1 | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 2 | 0 | | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 3 | 0 | 1 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-10. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Volumen ocupado por el módulo. Fuente: Propia

| Volumen ocupado por el módulo | 2=3>1 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------------------------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 2 | 1 | | 0,5 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 3 | 1 | 0,5 | | 1,5 | 0,500 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-11. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Movilidad. Fuente: Propia

| Movilidad | 2=3>1 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 2 | 1 | | 0,5 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 3 | 1 | 0,5 | | 1,5 | 0,500 |
| | | | | 3 | 1 |

2.1.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

La estructura de soporte se eligió tomando en cuenta el siguiente listado de criterios:

- Peso. Los conductos que lleven el fluido de trabajo deben ser lo mas liviano posible para no aumentar el peso del módulo y evitar desequilibrios por distribución no equitativa de carga. Mientras más liviana la opción obtendrá mayor puntaje.

- Resistencia a la corrosión por conducción de agua. Al ser un módulo didáctico cuyo fluido principal de trabajo es el agua, sus superficies deben ser lo suficientemente resistentes al contacto con agua, no debe degradarse ya que el incluir partículas al sistema puede representar un inconveniente para los elementos como las válvulas, bombas, uniones. Se otorga la mayor calificación al que presente mayor resistencia a la corrosión.
- Mantenimiento. Debe permitir fácil montaje y desmontaje para realizar actividades de mantenimiento. El mayor puntaje se entrega al que cumpla con todas las características mencionadas en este párrafo.
- Flexibilidad de adaptación a la geometría. Los accesorios y capacidades de la opción a escoger deben permitir adaptarse a seguir caminos y direcciones determinadas por el diseño además de fácil capacidad de modificación e instalación, así como gran variedad de dimensiones de diámetro disponibles.
- Costo. El costo debe ser el mínimo ya que los proyectistas corren con los gastos del trabajo.
- Resistencia presentada al flujo. La resistencia al paso del líquido depende de la rugosidad de la superficie interna del material de los conductos.
- Alimentación del sistema. Debe ser capaz de alimentar al sistema continuamente y con la presión y caudal necesarios en una manera constante y confiable.

2.1.4.1 Descripción de los candidatos

2.1.4.1.1 Opción 1

Sistema de tubería de polipropileno monocapa con sistema de alimentación directa del sistema de agua potable del LAIPM.

Tubería monocapa:

- Variedad de diámetros comerciales disponibles: 1/2", 3/4", 1", 1 1/4", 1 1/2" y 2".
- Facilidad de modificación y roscado.
- Variedad de accesorios. Capacidad de acople con accesorios de otros sistemas con rosca NPT.
- Presión de trabajo máxima de 830 kPa.
- Baja resistencia al flujo de líquido de trabajo.

Alimentación al sistema:

- No hay necesidad de otros equipos para alimentar al sistema
- Sistema fluctuante en cuanto a las características de presión y caudal al ser dependiente del sistema de suministro de agua potable.

2.1.4.1.2 Opción 2

Sistema de tubería de polipropileno monocapa con sistema de alimentación con tanque reservorio y bomba centrífuga.

Tubería monocapa:

- Variedad de diámetros comerciales disponibles: 1/2", 3/4", 1", 1 1/4", 1 1/2" y 2"
- Facilidad de modificación y roscado.
- Variedad de accesorios. Capacidad de acople con accesorios de otros sistemas con rosca NPT.
- Presión de trabajo máxima de 830 kPa.
- Baja resistencia al flujo de líquido de trabajo.

Alimentación al sistema:

- Sistema con estabilidad en suministro de presión y caudal
- Recirculación de agua que permite reducir su consumo
- Costo adicional por compra de la bomba centrífuga

2.1.4.1.3 Opción 3

Sistema de mangueras de poliuretano con sistema de alimentación directa del sistema de agua potable del LAIPM.

Tubería monocapa:

- Variedad de diámetros comerciales disponibles: 3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/4", 1 1/2" y 2"
- Facilidad de modificación y roscado.
- Variedad de accesorios. Reducción de necesidad de uso de accesorios
- Presión de trabajo máxima de 650 kPa.
- Baja resistencia al flujo de líquido de trabajo
- Costos relativamente elevados por no comercialización amplia en el mercado

Alimentación al sistema:

- No necesidad de otros equipos para alimentar al sistema
- Sistema fluctuante en cuanto a las características de presión y caudal al ser dependiente del sistema de suministro de agua potable.

Tabla 2-12. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la estructura soporte. Fuente: Propia

Evaluación de criterios

2>3=6>7>4>5>1

| | Peso | Resistencia a la corrosión por conducción de agua | Mantenimiento | Flexibilidad de adaptación a la geometría | Costo | Resistencia presentada al flujo | Alimentación del sistema | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---|------|---|---------------|---|-------|---------------------------------|--------------------------|---------------|-----------|
| Peso | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| Resistencia a la corrosión por conducción de agua | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 0,286 |
| Mantenimiento | 1 | 0 | | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 4,5 | 0,214 |
| Flexibilidad de adaptación a la geometría | 1 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 2 | 0,095 |
| Costo | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0,048 |
| Resistencia presentada al flujo | 1 | 0 | 0,5 | 1 | 1 | | 1 | 4,5 | 0,214 |
| Alimentación del sistema | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | | 3 | 0,143 |
| | | | | | | | | 21 | 1 |

Tabla 2-13. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes). Fuente: Propia

| Conclusión | Peso | Resistencia a la corrosión por conducción de agua | Mantenimiento | Flexibilidad de adaptación a la geometría | Costo | Resistencia presentada al flujo | Alimentación del sistema | Sumatorio | Prioridad |
|------------|-------|---|---------------|---|-------|---------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| Opción 1 | 0,000 | 0,143 | 0,107 | 0,016 | 0,032 | 0,107 | 0,024 | 0,429 | 2 |
| Opción 2 | 0,000 | 0,143 | 0,107 | 0,016 | 0,000 | 0,107 | 0,095 | 0,468 | 1 |
| Opción 3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,063 | 0,016 | 0,000 | 0,024 | 0,103 | 3 |

Tabla 2-14. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Peso. Fuente: Propia

| Peso | 3>1>2 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 1 | 0 | 1 | 0,333 |
| Opción 2 | 0 | | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 3 | 1 | 1 | | 2 | 0,667 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-15. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia a la corrosión por conducción de agua. Fuente: Propia

| Resistencia a la corrosión por conducción de agua | 1=2>3 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 2 | 0,5 | | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 3 | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-16. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento. Fuente: Propia

| Mantenimiento | 1=2>3 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---------------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 2 | 0,5 | | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 3 | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-17. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Flexibilidad de adaptación a la geometría. Fuente: Propia

| Flexibilidad de adaptación a la geometría | 3>1=2 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0,5 | 0 | 0,5 | 0,167 |
| Opción 2 | 0,5 | | 0 | 0,5 | 0,167 |
| Opción 3 | 1 | 1 | | 2 | 0,667 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-18. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo. Fuente: Propia

| Costo | 1>3>2 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 1 | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 2 | 0 | | 0 | 0 | 0,000 |
| Opción 3 | 0 | 1 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-19. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Resistencia presentada al flujo. Fuente: Propia

| Resistencia presentada al flujo | 1=2>3 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---------------------------------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 2 | 0,5 | | 1 | 1,5 | 0,500 |
| Opción 3 | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-20. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Alimentación del sistema. Fuente: Propia

| Alimentación del sistema | 2>3=1 | | | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|--------------------------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | | |
| Opción 1 | | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,167 |
| Opción 2 | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| Opción 3 | 0,5 | 0 | | 0,5 | 0,167 |
| | | | | 3 | 1 |

2.1.5 SELECCIÓN DE LAS VÁLVULAS DE CONTROL

Dada la disponibilidad de las electroválvulas de compuerta procedentes del LAIPM se han dispuesto estas para el control del flujo desde los tanques superiores hasta el inferior y la salida del último. Para las entradas principales al sistema, se tienen las siguientes necesidades y consecuentemente criterios para la selección:

- Capacidad de control de caudal. Se necesita un amplio rango de control de caudal inclusive en los límites de apertura de la válvula. Esta necesidad es de

suma importancia para el control del sistema dinámico por lo cual tiene mayor ponderación dentro de los criterios de selección.

- Caída de presión por la válvula. La presión suministrada por la alimentación de agua al sistema no debe ser afectada en muy alto grado por la válvula de control. La válvula seleccionada tendrá mayor puntaje mientras menor sea la caída de presión a través de esta.
- Torque de accionamiento. La válvula seleccionada tendrá mayor puntuación mientras menor sea el torque necesario para su accionamiento.
- Costo. Se entregará mayor puntaje a la válvula de menor costo.
- Mantenimiento. La necesidad de mantenimiento de la válvula es un criterio interesante, ya que al ser un aparato de laboratorio necesita que el mantenimiento sea mínimo y fácilmente programable y realizable. El mayor puntaje recibirá el candidato de mantenimiento simple y frecuencia menor.
- Disponibilidad inmediata de compra. Por la necesidad de realizar las pruebas correspondientes al sistema dinámico y al ser el alma del sistema de control la compra de las mismas debe hacerse de inmediato.
- Capacidad de operación frecuente. El centro del sistema de control del sistema son las válvulas a ser escogidas y van a ser requeridas en funcionamiento ampliamente, por lo que el candidato con mayor posibilidad y resistencia al uso frecuente tendrá el mayor puntaje.

Denotando que la función de la válvula va a ser el principal criterio de selección, se tienen tres candidatos principales: las válvulas de globo, las de mariposa y las de diafragma.

2.1.5.1 Descripción de los candidatos

2.1.5.1.1 *Válvula de mariposa*

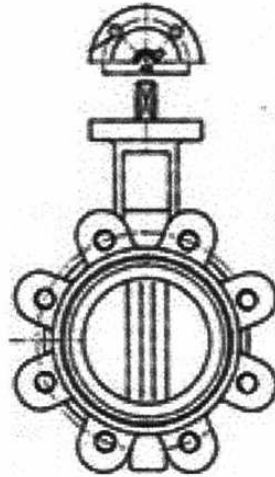


Fig. 2-1. Corte de una válvula de mariposa.²²

Válvula de un cuarto de vuelta que es capaz de regular el flujo por medio de un disco circular que gradualmente puede bloquear el paso del fluido dentro de la tubería. Trabaja con bajas caídas de presión en pasos de líquidos, gases, pastas semilíquidas y líquidos con sólidos suspendidos; es capaz de ser operada frecuentemente.

El mecanismo principal rota un eje que es perpendicular al eje longitudinal de la válvula lo que hace girar al disco regulador de caudal.

Las ventajas de su diseño son que son compactas, de peso ligero y bajo costo, además la necesidad de mantenimiento es reducida. El número de piezas móviles es mínimo, no tiene cavidades y se limpia por sí misma. Sus desventajas principales son la necesidad de un par de accionamiento alto y es propensa a la cavitación.

2.1.5.1.2 *Válvula de globo*

²² ROSALER, R. ; Manual del Ingeniero de Planta, Tomo 2; 2da ed.; McGraw – Hill; 1998; México

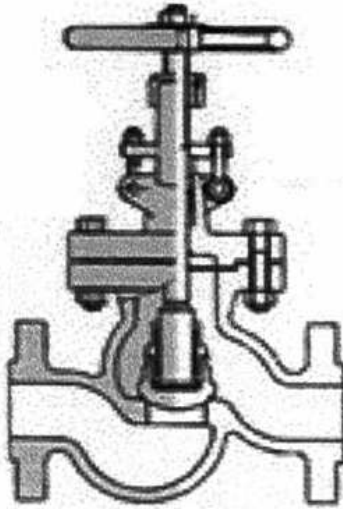


Fig. 2-2. Corte válvula de globo.²²

Ampliamente usadas en control de procesos, las válvulas de globo tienen un cuerpo que permite regular el caudal pero a expensas de una relativamente alta caída de presión, por el camino de laberinto que recorre el fluido transportado. Se utiliza para trabajos que necesiten la operación frecuente de la válvula.

El mecanismo principal eleva un disco o macho que permite el paso del fluido. Puede ser utilizado tanto para operaciones de cierre o corte de flujo como de estrangulación.

Las ventajas de este tipo de válvulas radica en su gran capacidad de regulación de caudal en los rangos de moderado hasta flujo pleno, además se produce un buen cierre; por el contrario, como ya se indicó, se produce una caída de presión grande por su construcción de laberinto, además se debe asegurar que el líquido esté libre de sólidos en suspensión ya que pueden dañar el asiento del disco al momento del cierre. Por su diseño, tanto el asiento como el disco (globo) pueden ser reparados y reemplazados con facilidad sin retirar la válvula de línea.

2.1.5.1.3 Válvulas de diafragma

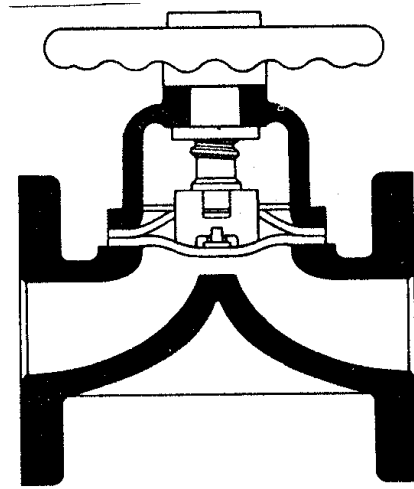


Fig. 2-3. Corte válvula de diafragma.²²

Válvula de vueltas múltiples que regula el paso del fluido con un diafragma que bloquea el paso del flujo.

El mecanismo principal eleva o hace descender al diafragma con lo cual se bloquea la comunicación entre los conductos de paso de fluido.

Las ventajas principales son su bajo costo, no hay posibilidad de fuga por el vástago. Es inmune a los problemas de obstrucción y corrosión. Las desventajas principales son que el diafragma es susceptible al desgaste y que el par torsor para cierre con tubería llena es alto.

2.1.5.2 Evaluación para la selección

Evaluación del peso específico de cada criterio de selección

La siguiente tabla presenta un análisis de los criterios considerados para la selección de las válvulas de control.

Tabla 2-21. Evaluación del peso específico de los criterios para la selección de la válvula de control. Fuente: Propia

Evaluación de criterios

1>3>7>6>4>5>2

| | Capacidad de control de flujo | Caída de presión por la válvula | Torque de accionamiento | Costo | Mantenimiento | Disponibilidad inmediata de compra | Capacidad de operación frecuente | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|---|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------|---------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------|-----------|
| 1 | Capacidad de control de flujo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 0,286 |
| 2 | Caída de presión por la válvula | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 3 | Torque de accionamiento | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 0,238 |
| 4 | Costo | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0,095 |
| 5 | Mantenimiento | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,048 |
| 6 | Disponibilidad inmediata de compra | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0,143 |
| 7 | Capacidad de operación frecuente | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0,190 |
| | | | | | | | | 21 | 1 |

Tabla 2-22. Conclusión de la evaluación (Resumen de resultados en base a tablas de evaluación subsiguientes). Fuente: Propia

| Conclusión | Capacidad de control de flujo | Caída de presión por la válvula | Torque de accionamiento | Costo | Mantenimiento | Disponibilidad inmediata de compra | Capacidad de operación frecuente | Sumatorio | Prioridad |
|------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------|---------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|
| Mariposa | 0,048 | 0,000 | 0,000 | 0,063 | 0,032 | 0,024 | 0,063 | 0,230 | 3 |
| Globo | 0,190 | 0,000 | 0,159 | 0,000 | 0,016 | 0,095 | 0,063 | 0,524 | 1 |
| Diafragma | 0,048 | 0,000 | 0,079 | 0,032 | 0,000 | 0,024 | 0,063 | 0,246 | 2 |

Tabla 2-23. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de control de flujo o estrangulación.

Fuente: Propia

Capacidad de control de flujo

2>1=3

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,167 |
| 2 Globo | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| 3 Diafragma | 0,5 | 0 | | 0,5 | 0,167 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-24. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Caída de presión a través de la válvula. Fuente:

Propia

Caída de presión por la válvula

1>3>2

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 1 | 1 | 2 | 0,667 |
| 2 Globo | 0 | | 0 | 0 | 0,000 |
| 3 Diafragma | 0 | 1 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-25. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Torque de accionamiento. Fuente: Propia

Torque de accionamiento

2>3>1

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 2 Globo | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| 3 Diafragma | 1 | 0 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-26. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo. Fuente: Propia

Costo **1>3>2**

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 1 | 1 | 2 | 0,667 |
| 2 Globo | 0 | | 0 | 0 | 0,000 |
| 3 Diafragma | 0 | 1 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-27. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Mantenimiento. Fuente: Propia

Mantenimiento

1>2>3

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 1 | 1 | 2 | 0,667 |
| 2 Globo | 0 | | 1 | 1 | 0,333 |
| 3 Diafragma | 0 | 0 | | 0 | 0,000 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-28. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Disponibilidad inmediata de compra. Fuente: Propia

Disponibilidad inmediata de compra

2>1=3

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,167 |
| 2 Globo | 1 | | 1 | 2 | 0,667 |
| 3 Diafragma | 0,5 | 0 | | 0,5 | 0,167 |
| | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-29. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de operación frecuente. Fuente: Propia

Capacidad de operación frecuente

1=2=3

| | Mariposa | Globo | Diafragma | Sumatorio + 1 | Ponderado |
|-------------|----------|-------|-----------|---------------|-----------|
| 1 Mariposa | | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,333 |
| 2 Globo | 0,5 | | 0,5 | 1 | 0,333 |
| 3 Diafragma | 0,5 | 0,5 | | 1 | 0,333 |
| | | | | 3 | 1 |

2.1.6 SELECCIÓN DE LOS MOTORES PARA AUTOMATIZAR EL CONTROL DE LAS VÁLVULAS

Se considerarán los siguientes criterios para la selección:

- Precisión de posicionamiento. Se necesita controlar minuciosamente el giro del motor (posiciones angulares específicas) para encontrar una función (muy aproximada) entre caudal y giro del motor.
- Peso. Es necesario que los motores que se empleen no sean de mucho peso. A menor peso, mayor será el puntaje que se obtenga.
- Rango de giro. Es más recomendable que el propio motor pueda girar un gran ángulo para que no haya la necesidad de construir un sistema que permita ampliar ese rango de giro, por ejemplo un sistema de engranajes; ya que este sistema puede encarecer el módulo. A mayor rango, mayor será el puntaje.
- Velocidad de giro constante. Es importante que la velocidad sea constante para que no produzca cambios bruscos que alteren al control PID.
- Capacidad de control. El control electrónico de estos motores debe ser versátil y fácil de entender. A mayor facilidad de control, mayor será el puntaje.
- Capacidad de cambio de giro. Debido a que se requiere controlar el nivel de un tanque, la válvula de control por la cual ingresa el caudal, estará en

constante apertura y cierre, por lo tanto se requiere que el motor cambie fácilmente el sentido de giro. Mientras mayor sea esta capacidad, mayor será el puntaje.

- Sensibilidad a variaciones de tensión. Debido a que el módulo formará parte del Laboratorio de Automatización Industrial, el cual se encuentra en una sección donde hay variaciones de tensión, es necesario que los motores que se vayan a emplear, tengan la capacidad de no reaccionar ante estas variaciones, de lo contrario, no se lograría el objetivo del control PID. Mientras menor sensibilidad presenten los motores, mayor será el puntaje obtenido.
- Torque proporcionado. Se requiere un torque lo suficientemente capaz para cerrar la válvula de control cuando esta se encuentre totalmente abierta.
- Costo. Debido a que es un módulo didáctico, el costo de estos motores no debe ser elevado. A menor costo, mayor puntaje obtenido.

Para la selección del tipo de motor más apropiado para este módulo didáctico, se considerarán los motores de corriente continua más frecuentemente empleados en electrónica debido a sus ventajas y principalmente a su facilidad de manipulación y control.

Estos son:

- Motor de DC
- Servomotor
- Motor paso a paso

2.1.6.1 Descripción de los candidatos

2.1.6.1.1 Motor de DC

Es un motor muy común y barato. En general está formado por dos imanes permanentes que se encuentran fijos en la carcasa (estator) y unas bobinas acopladas al eje del motor (rotor).

Su principio de funcionamiento se basa en la interacción (atracción o repulsión) entre el campo magnético del imán permanente y el que se genera por la excitación de las bobinas, que provoca el movimiento del eje del motor.

El sentido de giro del motor puede ser cambiado al cambiar la polaridad de la excitación de la bobina.

Si no se emplea un controlador, al aplicar el voltaje de entrada, el eje del motor girará a una velocidad constante y no parará sino hasta que se le haya retirado este voltaje; por lo cual no se pueden obtener posiciones específicas por sí solo.

Para controlar automáticamente tanto su sentido de giro como su velocidad se requieren circuitos electrónicos un poco complejos.



Fig. 2-4. Motor dc de 9V, 200 rpm, 60 mA.²³



Fig. 2-5. Motor dc con caja reductora de 12V.²³

2.1.6.1.2 Servomotor

Es un motor de corriente continua que logra posiciones específicas dentro de un rango de operación (de 0 a 180°) gracias a que recibe una serie de pulsos.

Generalmente este tipo de motor presenta: un amplificador de señales, un motor, un sistema reductor de la velocidad (generalmente engranajes) y un sistema de retroalimentación (incluye un potenciómetro).

²³ <http://www.monografias.com/trabajos/motores.html>

El voltaje que se aplica al motor es proporcional a la distancia que se requiere recorrer, por lo tanto la velocidad de giro no es constante sino que depende de la distancia a recorrer.

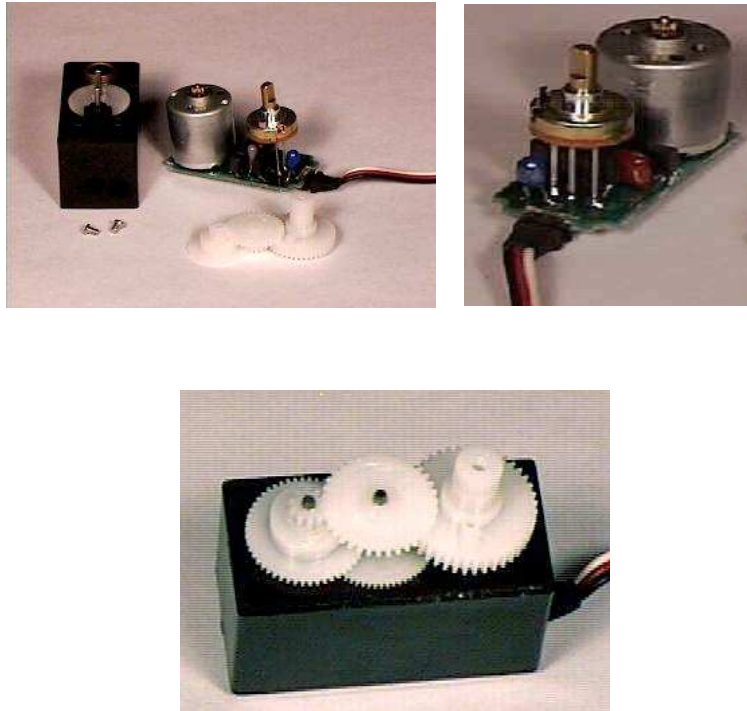


Fig. 2-6. Servomotor desmontado²⁴

2.1.6.1.3 Motor paso a paso (PaP)

Es un motor de corriente continua que transforma pulsos electrónicos en un desplazamiento angular específico, es decir, este tipo de motor se mueve un paso por cada pulso que le sea aplicado. Dependiendo del fabricante este paso puede variar desde ángulos muy pequeños por ejemplo $1,8^\circ$ (se requerirían 200 pasos para completar 360°) hasta ángulos grandes, por ejemplo de 90° (se requerirían 4 pasos para completar 360°).

²⁴ http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/motores_servo.htm

Este tipo de motor presenta alta precisión en su giro y por tanto en el desplazamiento y posición angular. Por otra parte, presenta mayores torques a velocidades bajas.

A diferencia de otro tipo de motores, estos motores pueden quedar enclavados en la posición final, o quedar libres; todo depende de si sus bobinas se encuentran o no energizadas. Presenta mayores torques a velocidades bajas.

A pesar de que existen varias clases de motores paso a paso, todas presentan bobinas que deben ser energizadas. Por cada señal, se puede obtener un paso o medio paso dependiendo de la conmutación o excitación de sus bobinas.

Los motores paso a paso más comunes son los de imán permanente: unipolar y bipolar

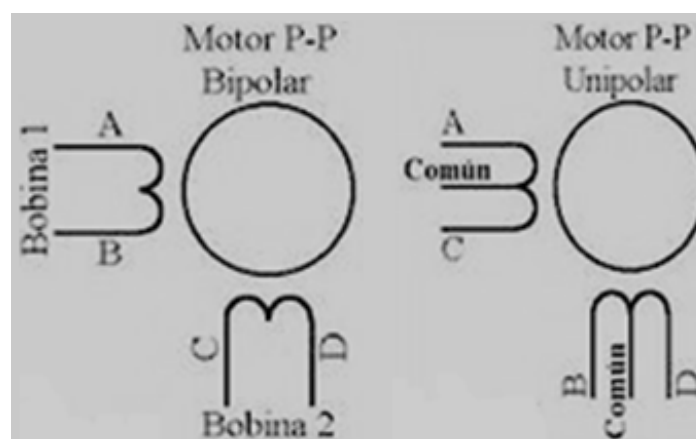


Fig. 2-7. Motor paso a paso. Bipolar y Unipolar.²⁵

Mediante el gráfico se puede apreciar que los motores bipolares presentan 2 bobinas independientes, y 4 cables de salida. Por otra parte, los motores unipolares presentan 2 bobinas con un terminal intermedio, lo cual equivale a 4 bobinas y 6 cables de salida (o 5 si se unifica el terminal común).

²⁵ Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado sin perturbaciones

La secuencia de excitación de las bobinas se la lleva a cabo mediante un controlador electrónico. Al invertir la secuencia de excitación, se logra fácilmente cambiar el sentido de giro.

En general todo motor paso a paso se puede caracterizar por los siguientes parámetros:

- Voltaje
- Resistencia eléctrica. La resistencia de los bobinados determina la corriente que consume el motor. Infiuye en la tanto en la curva de torque del motor como en la velocidad (máxima) de operación.
- Grados por paso. Determina los grados que rota el eje del motor por cada paso.



Fig. 2-8. Varios motores paso a paso.²⁶

²⁶ Esquema de funcionamiento de un control de lazo cerrado sin perturbaciones

2.1.6.2 Evaluación para la selección

Tabla 2-30. Tabla de evaluación de criterios

Evaluación de criterios 1>3=5>4>6>2>7>8

| | Precisión de posicionamiento | Rango de giro | Velocidad de giro constante | Capacidad de control | Capacidad de cambio de giro | Sensibilidad a variaciones de tensión | Torque proporcionado | Costo | Sumatorio +1 | Ponderado |
|---|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------|--------------|-----------|
| 1 | Precisión de posicionamiento | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 | 0,246 |
| 2 | Rango de giro | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 0,070 |
| 3 | Velocidad de giro constante | 1 | | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 5 | 0,175 |
| 4 | Capacidad de control | 1 | 0 | | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 4,5 | 0,158 |
| 5 | Capacidad de cambio de giro | 1 | 0,5 | 0,5 | | 1 | 1 | 1 | 5 | 0,175 |
| 6 | Sensibilidad a variaciones de tensión | 1 | 0,5 | 0 | 0 | | 0,5 | 1 | 3 | 0,105 |
| 7 | Torque proporcionado | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | | 0,5 | 1,5 | 0,053 |
| 8 | Costo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | | 0,5 | 0,018 |
| | | | | | | | | | 28,5 | 1 |

Tabla 2-31. Conclusión de la evaluación de las tablas anteriores. Fuente: Propia

| Conclusión | Precisión de posicionamiento | Velocidad de giro constante | Capacidad de cambio de giro | Capacidad de control | Sensibilidad a variaciones de tensión | Rango de giro | Torque proporcionado | Costo | SUMATORIO | PRIORIDAD |
|------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|----------------------|-------|-----------|-----------|
| Motor DC | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,17 | 3 |
| Servomotor | 0,12 | 0,00 | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,25 | 2 |
| Motor PAP | 0,12 | 0,10 | 0,12 | 0,11 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,57 | 1 |

Tabla 2-32. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Precisión de posicionamiento

Precisión de posicionamiento $2=3>1$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Servomotor | 1 | | 0,5 | 1,5 | 0,5 |
| 3 | Motor PAP | 1 | 0,5 | | 1,5 | 0,5 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-33. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Velocidad de giro constante

Velocidad de giro constante $3>1>2$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 1 | 0,5 | 1,5 | 0,43 |
| 2 | Servomotor | 0 | | 0 | 0 | 0,00 |
| 3 | Motor PAP | 1 | 1 | | 2 | 0,57 |
| | | | | | 3,5 | 1 |

Tabla 2-34. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de cambio de giro.

Capacidad de cambio de giro $3>2>1$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | Servomotor | 1 | | 0 | 1 | 0,33 |
| 3 | Motor PAP | 1 | 1 | | 2 | 0,67 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-35. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Capacidad de control.

Capacidad de control $3>2>1$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | Servomotor | 1 | | 0 | 1 | 0,33 |
| 3 | Motor PAP | 1 | 1 | | 2 | 0,67 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-36. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Sensibilidad a variaciones de tensión.

Sensibilidad a variaciones de tensión $3=1>2$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 1 | 0,5 | 1,5 | 0,5 |
| 2 | Servomotor | 0 | | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Motor PAP | 0,5 | 1 | | 1,5 | 0,5 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-37. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Rango de giro.

Rango de giro $3=1>2$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 1 | 0,5 | 1,5 | 0,5 |
| 2 | Servomotor | 0 | | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Motor PAP | 0,5 | 1 | | 1,5 | 0,5 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-38. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Torque proporcionado.

Torque proporcionado $3>2>1$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| 2 | Servomotor | 1 | | 0 | 1 | 0,33 |
| 3 | Motor PAP | 1 | 1 | | 2 | 0,67 |
| | | | | | 3 | 1 |

Tabla 2-39. Evaluación de candidatos de acuerdo al criterio: Costo.

Costo $1>3>2$

| | | Motor DC | Servomotor | Motor PAP | SUMATORIO +1 | PONDERADO |
|---|------------|----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | Motor DC | | 1 | 1 | 2 | 0,67 |
| 2 | Servomotor | 0 | | 0 | 0 | 0,00 |
| 3 | Motor PAP | 0 | 1 | | 1 | 0,33 |
| | | | | | 3 | 1 |

2.1.7 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR PARA EL MÓDULO DIDÁCTICO

El PLC con el que se desarrollará esta tesis provendrá del Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos y corresponde a la marca Allen Bradley, Micrologix 1100, modelo: 1763-L16BBB, serie: A.



Fig. 2-9. PLC Allen Bradley 1763-116BBB, serie A.

Tabla 2-40. Características del PLC Allen Bradley 1763-L16BBB

| Ítem | Descripción | |
|--|---------------------|---|
| Voltaje de activación | 24 VDC (-15%, +10%) | |
| Amperaje máx (corriente de entrada al momento del arranque de la fuente eléctrica) | 15 A durante 20 ms | |
| Entradas | Digitales | <ul style="list-style-type: none"> • 6 entradas de 10 a 24 VDC • 4 entradas de alta velocidad de 10 a 24 VDC. |

| | | |
|--------------------------|---|--|
| | | 8.5 mA a 24 VDC |
| | Analógicas | <ul style="list-style-type: none"> • 2 entradas de voltaje (de 0 a 10 VDC) |
| Salidas | Digitales | <ul style="list-style-type: none"> • 2 salidas de relé • 2 salidas FET de 24 VDC • 2 salidas FET de alta velocidad de 24 VDC Corriente continua máx: 5A |
| Puertos de comunicación | <ul style="list-style-type: none"> • 1 puerto RS-232/485 combinado. • 1 puerto para Ethernet | |
| Otros puertos | <ul style="list-style-type: none"> • 1 interface del conector de bus a módulos de entradas/salidas de expansión • 1 puerto para expansión de módulos de entrada y/o salida. | |
| Temperatura de operación | -20°C a +65°C | |

Tabla 2-41. Especificaciones de las entradas del PLC.

| Entradas digitales | |
|--|-----------------------------|
| Ítem | Descripción |
| Rango de voltaje en estado de activación | 10 a 24 VDC |
| Rango de voltaje en estado desactivado | 0 a 5 VDC |
| Corriente en estado de activación | 8,5 mA a 24 VDC |
| Entradas analógicas | |
| Ítem | Descripción |
| Rango de entrada de voltaje | 0 a 10 VDC |
| Tipo de datos | Entero de 10 bits sin signo |
| Codificación de entrada | 0 a +1023 |
| Resolución de entrada | 10 bits |

| | |
|--|----------|
| Protección contra sobretensión de entrada de voltaje | 10,5 VDC |
|--|----------|

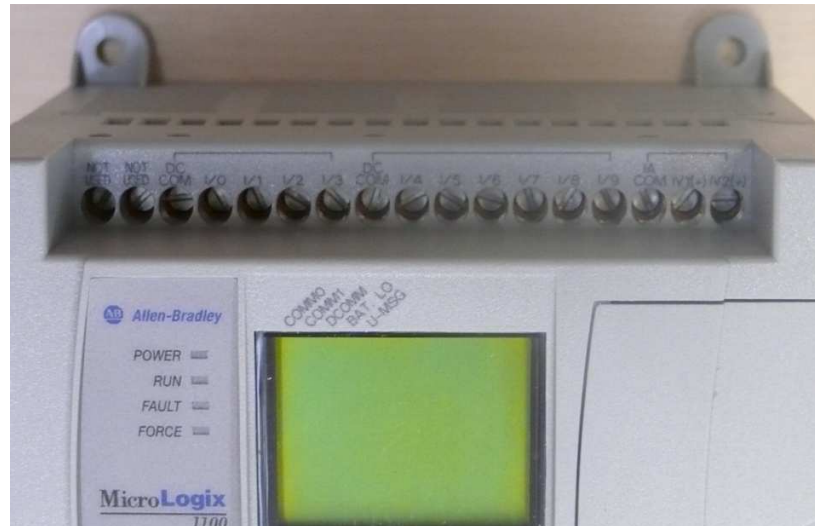
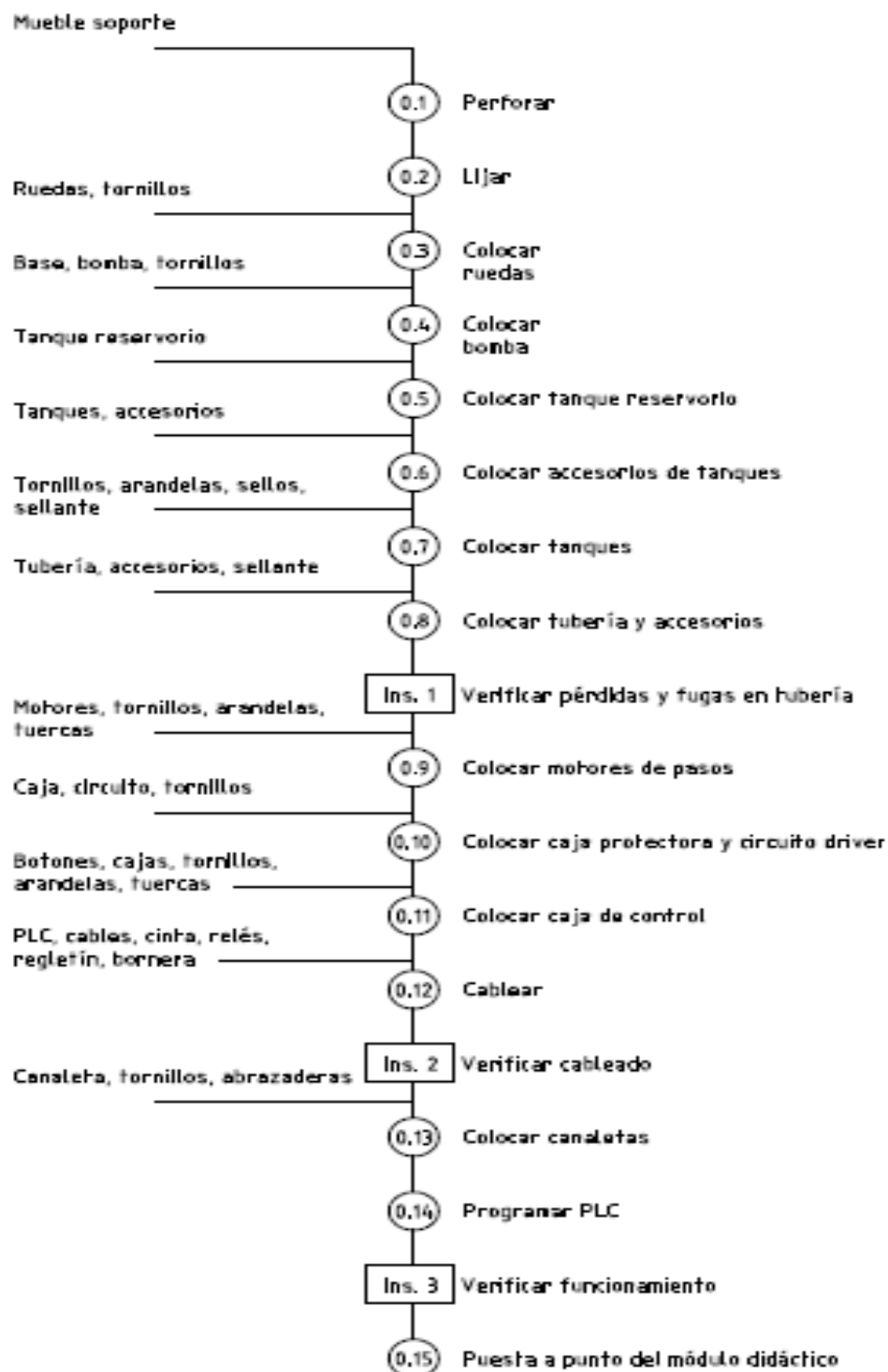


Fig. 2-10. Puerto de entradas digitales/análogicas.

Tabla 2-42. Especificaciones de las salidas del PLC.

| Salidas de relé FET | |
|---|---------------------|
| Ítem | Descripción |
| Corriente por común de grupo | 5A |
| Voltaje de fuente de alimentación eléctrica | 24 VDC (-15%, +10%) |
| Salidas de relé | |
| Ítem | Descripción |
| Tiempo de activación/desactivación | 10 ms (máx) |
| Corriente de carga | 10 mA (mín) |

2.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN



* En el anexo J se pueden apreciar las fotos del módulo didáctico, incluyendo ciertos detalles de la construcción.

2.3 COSTOS DEL PROYECTO

Tabla 2-43. Tabla de costo de materiales, herramientas e insumos

| Ítem | Descripción | Unidad | Cant. | Precio (USD) | | Documento de referencia | Lugar de Compra | Página en Anexo |
|------|------------------------------|--------|-------|--------------|-------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | | Unitario | Total | | | |
| 1 | Abrazadera 1" | U | 5,00 | 0,16 | 0,80 | 003577 | RG Cia. Ltada. | 16 |
| 2 | Acoples | U | 4,00 | 11,00 | 44,00 | - | - | - |
| 3 | Adapt. tanque D=12,7 mm | U | 3,00 | 2,48 | 7,45 | 002-005-0415111 | Kywi | 14 |
| 4 | Adapt. tanque D=25,4 mm | U | 1,00 | 1,35 | 1,35 | 002-005-0411613 | Kywi | 13 |
| 5 | Amarracable x 100 | U | 12,00 | 0,01 | 0,09 | 002-005-0411613 | Kywi | 13 |
| 6 | Arandela | U | 6,00 | 0,01 | 0,06 | 001-006-0452241 | Kywi | 8 |
| 7 | Arandela | U | 16,00 | 0,01 | 0,15 | 001-006-0452241 | Kywi | 8 |
| 8 | Arandela | U | 6,00 | 0,04 | 0,24 | 002-002-0142082 | Kywi | 10 |
| 9 | Arandela de presión | U | 6,00 | 0,01 | 0,06 | 001-006-0452241 | Kywi | 8 |
| 10 | Arandela de presión | U | 4,00 | 0,01 | 0,04 | 001-006-0452241 | Kywi | 8 |
| 11 | Arandela de presión | U | 4,00 | 0,01 | 0,04 | 002-005-0411613 | Kywi | 13 |
| 12 | Base de caucho | U | 1,00 | 15,00 | 15,00 | - | Vikingo | - |
| 13 | Bomba centrífuga | U | 1,00 | 32,00 | 32,00 | - | Juan El Juri | - |
| 14 | Bornera 12P/15A con tapa | U | 1,00 | 2,06 | 2,06 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 15 | Cable flexible AWG 14 | m | 6,00 | 0,28 | 1,68 | 001-001-0042097 | El Sol | 2 |
| 16 | Cable flexible AWG 16 | m | 46,00 | 0,28 | 12,74 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 17 | Caja Metálica 300x300x160 mm | U | 1,00 | 30,58 | 30,58 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 18 | Caja plástica 175x110x66 mm | U | 1,00 | 7,32 | 7,32 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 19 | Canaleta PP | m | 3,00 | 1,69 | 5,07 | 001-001-0042097 | El Sol | 2 |

| | | | | | | | | |
|----|--|---|-------|--------|--------|------------------|---------------------|----|
| 20 | Cinta aislante 3M | U | 1,00 | 1,43 | 1,43 | - | - | - |
| 21 | Circuito Driver Motores de Pasos | U | 1,00 | 75,00 | 75,00 | SD002 | Visionario | 20 |
| 22 | Codo H-H 90° D=12,7 mm | U | 8,00 | 0,37 | 2,96 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 23 | Codo H-H 90° D=25,4 mm | U | 6,00 | 1,08 | 6,48 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 24 | Filtro $\Phi=25,4$ mm | U | 1,00 | 9,70 | 9,70 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 25 | Flotador sensor analógico | U | 3,00 | 10,00 | 30,00 | - | - | - |
| 26 | Flotador reservorio | U | 1,00 | 9,00 | 9,00 | - | - | - |
| 27 | Fuente 24 VDC | U | 1,00 | 50,00 | 50,00 | SD002 | Visionario | 20 |
| 28 | Fuente 3 - 5 - 12 VDC | U | 1,00 | 10,00 | 10,00 | - | - | - |
| 29 | Grillete zincado | U | 5,00 | 1,50 | 7,50 | 002-002-0142082 | Kywi | 10 |
| 30 | Machuelo HSS - 3x0,50 | U | 1,00 | 18,88 | 18,88 | 002-002-2343903 | Castillo Hnos. | 12 |
| 31 | Manguera inc. accesorios y abrazaderas | m | 0,80 | 10,19 | 8,15 | S001-001-0066670 | Ecuamangueras | 18 |
| 32 | Micrologix 1100 Serie A | U | 1,00 | 500,00 | 500,00 | SD008 | www.eBay.com | 23 |
| 33 | Micrologix IFO2024 | U | 1,00 | 276,36 | 276,36 | SD009 | www.buyplcparts.com | 24 |
| 34 | Motor de pasos | U | 2,00 | 40,00 | 80,00 | SD007 | www.eBay.com | 22 |
| 35 | Mueble soporte | U | 1,00 | 125,00 | 125,00 | SD006 | Carpintería EPN | 21 |
| 36 | Pasta, suelda de estaño | U | 1,00 | 1,35 | 1,35 | - | - | - |
| 37 | Perno prisionero 3x0,5x16 | U | 4,00 | 0,18 | 0,72 | 002-002-2343891 | Castillo Hnos. | 11 |
| 38 | Pie de amigo | U | 2,00 | 0,93 | 1,86 | 001-005-0402877 | Kywi | 7 |
| 39 | Pilsador tipo hongo Rojo | U | 1,00 | 3,32 | 3,32 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 40 | Pin | U | 2,00 | 0,26 | 0,52 | 001-006-0452241 | Kywi | 8 |
| 41 | Pulsador verde | U | 1,00 | 2,19 | 2,19 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 42 | Reducción 25,4x12,7 mm | U | 2,00 | 1,00 | 2,00 | - | - | - |
| 43 | Regletín | m | 0,55 | 1,25 | 0,69 | - | - | - |
| 44 | Relé auxiliar 2P-24VDC/10A | U | 1,00 | 7,25 | 7,25 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 45 | Rosca c/tuerca D=12,7 mm | U | 11,00 | 0,35 | 3,85 | 002319 | Inducom | 15 |

| | | | | | | | | |
|----|---------------------------|---|------|-------|-----------------|-----------------|----------------|----|
| 46 | Rosca c/tuerca D=25,4 mm | U | 9,00 | 0,59 | 5,31 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 47 | Rueda | U | 4,00 | 2,25 | 9,00 | - | Ferrisariato | - |
| 48 | Sellante de Polipropileno | U | 1,00 | 3,14 | 3,14 | 002-002-0011097 | Kywi | 9 |
| 49 | Sello | U | 3,00 | 0,13 | 0,38 | SD001 | - | 19 |
| 50 | Tanque 1 | U | 1,00 | 10,00 | 10,00 | - | - | - |
| 51 | Tanque 2 | U | 1,00 | 10,00 | 10,00 | - | - | - |
| 52 | Tanque 3 | U | 1,00 | 10,00 | 10,00 | - | - | - |
| 53 | Tanque reservorio | U | 1,00 | 14,10 | 14,10 | 001-001-155462 | Plásticos ab | 4 |
| 54 | Tapón macho | U | 2,00 | 0,47 | 0,94 | 002-002-0142082 | Kywi | 10 |
| 55 | Tarraja | U | 1,00 | 26,69 | 26,69 | 002-002-0011097 | Kywi | 9 |
| 56 | Tee $\Phi=25,4$ mm | U | 2,00 | 1,80 | 3,60 | 002319 | Inducom | 15 |
| 57 | Terminal ojo | U | 6,00 | 0,05 | 0,32 | 001-001-0051176 | EME | 3 |
| 58 | Tornillo | U | 6,00 | 0,07 | 0,42 | 002-002-0142082 | Kywi | 10 |
| 59 | Tornillo | U | 8,00 | 0,06 | 0,51 | 001-002-0067949 | Rueda | 6 |
| 60 | Tornillo inc. tuerca | U | 3,00 | 0,08 | 0,24 | 002-002-0142082 | Kywi | 10 |
| 61 | Tornilo | U | 4,00 | 0,05 | 0,22 | 001-002-0067639 | Rueda | 5 |
| 62 | Tubo D=12,7mm | m | 1,36 | 1,47 | 2,00 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 63 | Tubo D=25,4mm | m | 1,98 | 3,89 | 7,71 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 64 | Unión R-R D=12,7 mm | U | 3,00 | 0,38 | 1,14 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 65 | Unión R-R D=25,4 mm | U | 3,00 | 0,84 | 2,52 | 21059 | Dismacon | 1 |
| 66 | Válv. esfera D=12,7 mm | U | 3,00 | 2,48 | 7,45 | 002-005-0415111 | Kywi | 14 |
| 67 | Válvula check | U | 1,00 | 8,54 | 8,54 | 003577 | RG Cia. Ltada. | 16 |
| 68 | Válvula de globo | U | 2,00 | 12,52 | 25,04 | 007-001-0059576 | La Llave S.A. | 17 |
| 69 | Válvula de pie D=25,4 mm | U | 1,00 | 11,77 | 11,77 | 21059 | Dismacon | 1 |
| | | | | | Subtotal (USD) | 1555,9 | | |
| | | | | | IVA (12%) (USD) | 3 | | |
| | | | | | Total (USD) | 186,71 | | |
| | | | | | | 1742,6 | | |

Tabla 2-44. Gastos Administrativos.

| Ítem | Descripción | Unidad | Cant. | Unitario | Total | Documento de referencia | Lugar de Compra | Página en Anexo |
|--------------------|----------------------------------|--------|---------|----------|----------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 | Papel Bond 75 g. 500 u | U | 3,00 | 3,00 | 9,00 | - | Mmicrocomponen tes | - |
| 2 | Copiado documentos | U | 1000,00 | 0,03 | 30,00 | - | Copiadora AEIM | - |
| 3 | Anillado de docuementos | U | 3,00 | 2,00 | 6,00 | - | Copiadora AEIM | - |
| 5 | Impresiones | U | 1000,00 | 0,02 | 20,00 | - | Mmicrocomponen tes | - |
| 6 | Ploteado B/N Formato A0 | U | 8,00 | 1,80 | 14,40 | - | - | - |
| 7 | Ploteado B/N Formato A2 | U | 6,00 | 1,20 | 7,20 | - | Copiadora AEIM | - |
| 8 | Ploteado B/N Formato A3 | U | 6,00 | 0,75 | 4,50 | - | Copiadora AEIM | - |
| 9 | Ploteado B/N Formato A4 | U | 12,00 | 0,25 | 3,00 | - | Copiadora AEIM | - |
| 10 | Transporte y varios* | U | 1,00 | 100,00 | 100,00 | - | - | - |
| 11 | Honorarios preprofesionales** | U | 2,00 | 1188 | 2376,00 | - | - | - |
| Subtotal (USD) | | | | | 2570,10 | | | |
| IVA (12%) (USD) | | | | | 308,41 | | | |
| Total (USD) | | | | | 2878,51 | | | |

Tabla 2-45. Costos totales

| Ítem | Costo Unitario (USD) |
|--|-------------------------|
| Costo de materiales, herramientas e insumos | 1742,64 |
| Costos de oficina y honorarios preprofesionales | 2878,51 |
| Total (USD) | 4621,16 |

CAPÍTULO 3

3 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

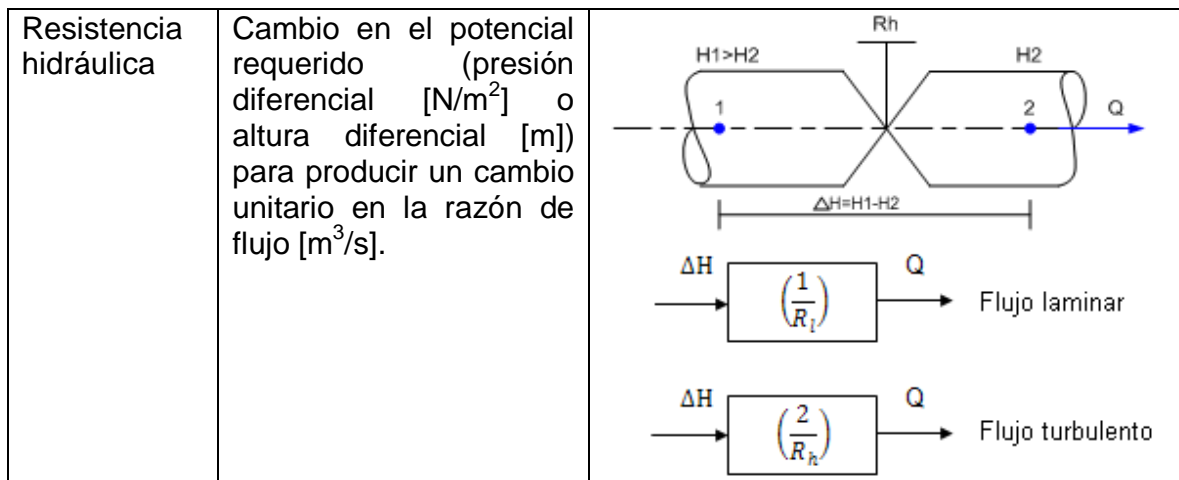
3.1 ESTUDIO DEL SISTEMA DINÁMICO DE NIVEL DE LÍQUIDO

3.1.1 ELEMENTOS Y VARIABLES DEL SISTEMA

Los elementos que intervienen en este sistema se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3-1. Tabla de resumen de elementos generales que intervienen en un sistema hidráulico. Fuente: propia.

| Elemento | Significado Físico | Representación |
|-------------------------|---|----------------|
| Capacitancia hidráulica | <p>Cambio en la cantidad de volumen del líquido [m³] para producir un cambio unitario en la presión $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ o altura [m].</p> <p>*Al escoger la altura como medida del potencial, el área transversal constante de un tanque coincide con su área.</p> <p>$C = A_{\text{transversal tanque}}$</p> | |
| Inertancia hidráulica | <p>Representa el cambio de la presión [N/m²] o altura [m] necesario para producir una aceleración del flujo líquido volumétrico [m³/s²].</p> | |



3.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS PERTINENTES AL SISTEMA

Las propiedades físicas a determinar son aquellas que determinarán el comportamiento del sistema. Se presenta un resumen de las principales determinadas:

Condiciones de trabajo

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de las condiciones ambientales de trabajo.

Tabla 3-2. Tabla de resumen de condiciones ambientales de trabajo

| Condiciones ambientales de trabajo | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Temperatura ambiente ($^{\circ}C$) | 20 |
| Presión de vapor (kPa) | 3,169 |
| Viscosidad agua (m^2/s) | $1,005 \times 10^{-6}$ |
| Gravedad (m/s^2) | 9,78 |
| Presión atmosférica (kPa) | 73,02 |

3.1.2.1 Capacitancia de los tanques

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (83)$$

Ejemplo de cálculo

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi (0.33m)^2}{4} = 0.086 \text{ m}^2 \quad (84)$$

En la siguiente tabla se presenta un resumen del área transversal interna de los tanques que constituyen el módulo:

Tabla 3-3. Resumen del cálculo del área transversal de los tanques.

| Ítem | D (m) | A (m ²) |
|----------|-------|---------------------|
| Tanque 1 | 0,33 | 0,086 |
| Tanque 2 | 0,33 | 0,086 |
| Tanque 3 | 0,26 | 0,053 |

3.1.2.2 Resistencia de las líneas de conducción (Tubería a la salida de cada tanque)

La determinación de los valores de las resistencias de los tanques se la realizó de manera experimental, siguiendo los procedimientos que se detallan a continuación.

3.1.2.2.1 Procedimiento para tanques T1 y T2

1. Cebarr la bomba.
2. Llenar el tanque reservorio TR hasta el nivel indicado como superior.
3. Cerrar la válvula V1 o V2 respectivamente (dependiendo de la resistencia a evaluar.
4. Abrir la válvula VG1 o VG2 respectivamente (dependiendo de la resistencia a determinar, se abre la que entra al tanque y se cierra completamente la del tanque no estudiado).
5. Abrir la válvula V3, para efectos de retorno del líquido al tanque de reserva.

6. Determinar dos alturas legibles separadas con 500 – 600 mm.
7. Verificar los pasos anteriores.
8. Encender la bomba.
9. Llegar al nivel superior indicado y abrir la válvula de salida del tanque estudiado.
10. Regular la apertura de la válvula de globo correspondiente para mantener el nivel superior indicado.
11. Cuantificar el caudal que sale del tanque, tomando el tiempo que toma llenar el volumen de un recipiente adecuado (volumen del recipiente medido con anterioridad).
12. Repetir la toma de datos de caudal por 3 o 4 veces mas, para poder determinar un promedio en los cálculos, y de igual manera repetir el procedimiento para la medida de nivel inferior
13. Apagar la bomba y permitir que el líquido retorne al tanque reservorio

3.1.2.2.2 Procedimiento para tanque T3

1. Cebarr la bomba.
2. Llenar el tanque reservorio TR hasta el nivel indicado como superior.
3. Abrir las válvulas V1 y V2.
4. Abrir las válvulas VG1 y VG2 respectivamente.
5. Cerrar la válvula V3.
6. Determinar dos alturas legibles separadas con 500 – 600 mm.
7. Verificar los pasos anteriores.
8. Encender la bomba.
9. Llegar al nivel superior indicado y abrir la válvula de salida del tanque estudiado T3.
10. Regular la apertura de las válvulas de globo correspondiente para mantener el nivel superior indicado.

11. Cuantificar el caudal que sale del tanque, tomando el tiempo que toma llenar el volumen de un recipiente adecuado (Volumen del recipiente medido con anterioridad).
12. Repetir la toma de datos de caudal por 3 o 4 veces mas, para poder determinar un promedio en los cálculos y de igual manera repetir el procedimiento para la medida de nivel inferior.
13. Apagar la bomba y permitir que el líquido retorne al tanque reservorio.

Para calcular las resistencias de las salidas de los tanques R_1 , R_2 , R_3 se indican los cálculos siguientes:

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta Q} \quad (85)$$

$$R = \frac{H_1 - H_2}{Q_1 - Q_2} \quad (86)$$

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i} \quad (87)$$

$$V_1 = V_2 = V \quad (88)$$

$$R = \frac{H_1 - H_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{H_1 - H_2}{\frac{V_1}{t_1} - \frac{V_2}{t_2}} = \frac{H_1 - H_2}{V \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)} \quad (89)$$

Ejemplo de cálculo: Cálculo para el tanque 1:

$$H_1 = 0,101 \text{ m}$$

$$H_2 = 0,045 \text{ m}$$

$$t_1 = 3,10 \text{ s}$$

$$t_2 = 3,63 \text{ s}$$

$$V = 0,00045 \text{ m}^3$$

$$R_1 = \frac{H_1 - H_2}{V \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)} = 2642,2 \frac{\text{m}}{\frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 2642,2 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \quad (90)$$

Tabla 3-4. Resumen de cálculo para la resistencia R de los tanques 1,2 y 3. Fuente: propia.

| Determinación de las constantes de constricción de las salidas de los tanques 1, 2 y 3 | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|------------------------|----------------|
| | H ₁ (m) | H ₂ (m) | t ₁ (s) | t ₂ (s) | V (m ³) | Q ₁ (m ³ /s) | Q ₂ (m ³ /s) | ΔH (m) | ΔQ (m ³ /s) | R |
| Tanque 1 | 0,101 | 0,045 | 3,10 | 3,63 | 0,00045 | 0,000145 | 0,000124 | 0,056 | 2,119E-05 | 2642,21 |
| Tanque 2 | 0,103 | 0,056 | 7,86 | 8,84 | 0,00045 | 0,000057 | 0,000051 | 0,047 | 6,347E-06 | 7405,15 |
| Tanque 3 | 0,101 | 0,045 | 3,22 | 3,37 | 0,00045 | 0,000140 | 0,000134 | 0,056 | 6,220E-06 | 9002,64 |

En función de los valores de las resistencias se pueden generar unos datos aproximados de caudal que pueden salir de los diferentes tanques y en base a estos se puede obtener una idea del número de Reynolds y así el comportamiento del flujo.

$$R = \frac{H}{Q} \rightarrow Q = \frac{H}{R} \quad (91)$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi v D} = \frac{4H}{\pi v R D} \quad (92)$$

Ejemplo de cálculo: Para la altura mínima de funcionamiento propuesta para tanque 1.

$$Re = \frac{4H}{\pi v R D} = \frac{4(0,020m)}{\pi \left(1,005 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right) \left(2642,21 \frac{m}{m^3/s}\right) (0,0127 m)} = 755,10 \quad (93)$$

Tabla 3-5. Resumen de cálculo del número de Reynolds. Fuente: propia.

| Ítem | H (m) | | Q (m ³ /s) | Re | Flujo |
|----------|------------------|-------|-----------------------|---------|------------|
| Tanque 1 | Mínimo propuesto | 0,020 | 0,0076 | 755,09 | Laminar |
| | Máximo propuesto | 0,185 | 0,0700 | 6984,62 | Turbulento |
| Tanque 2 | Mínimo propuesto | 0,020 | 0,0027 | 269,42 | Laminar |
| | Máximo propuesto | 0,185 | 0,0250 | 2492,17 | Turbulento |
| Tanque 3 | Mínimo propuesto | 0,020 | 0,0022 | 221,62 | Laminar |
| | Máximo propuesto | 0,150 | 0,0167 | 1662,11 | Laminar |

La tabla 3-5 indica que el flujo va a ser tanto laminar como turbulento, esto se tomará en cuenta al momento de establecer el modelo matemático.

3.1.2.3 Inertancia del sistema hidráulico

Para el estudio de sistemas de tanques llenos de líquido que se encuentran conectados, los elementos importantes para el estudiar del modelo matemático son la resistencia y la capacitancia. La inertancia no es considerada ya que en este sistema, sus efectos pueden ser despreciables.²⁷

3.1.3 DETERMINACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO DEL SISTEMA

3.1.3.1 Determinación del modelo físico

²⁷ OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; pág 200; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México

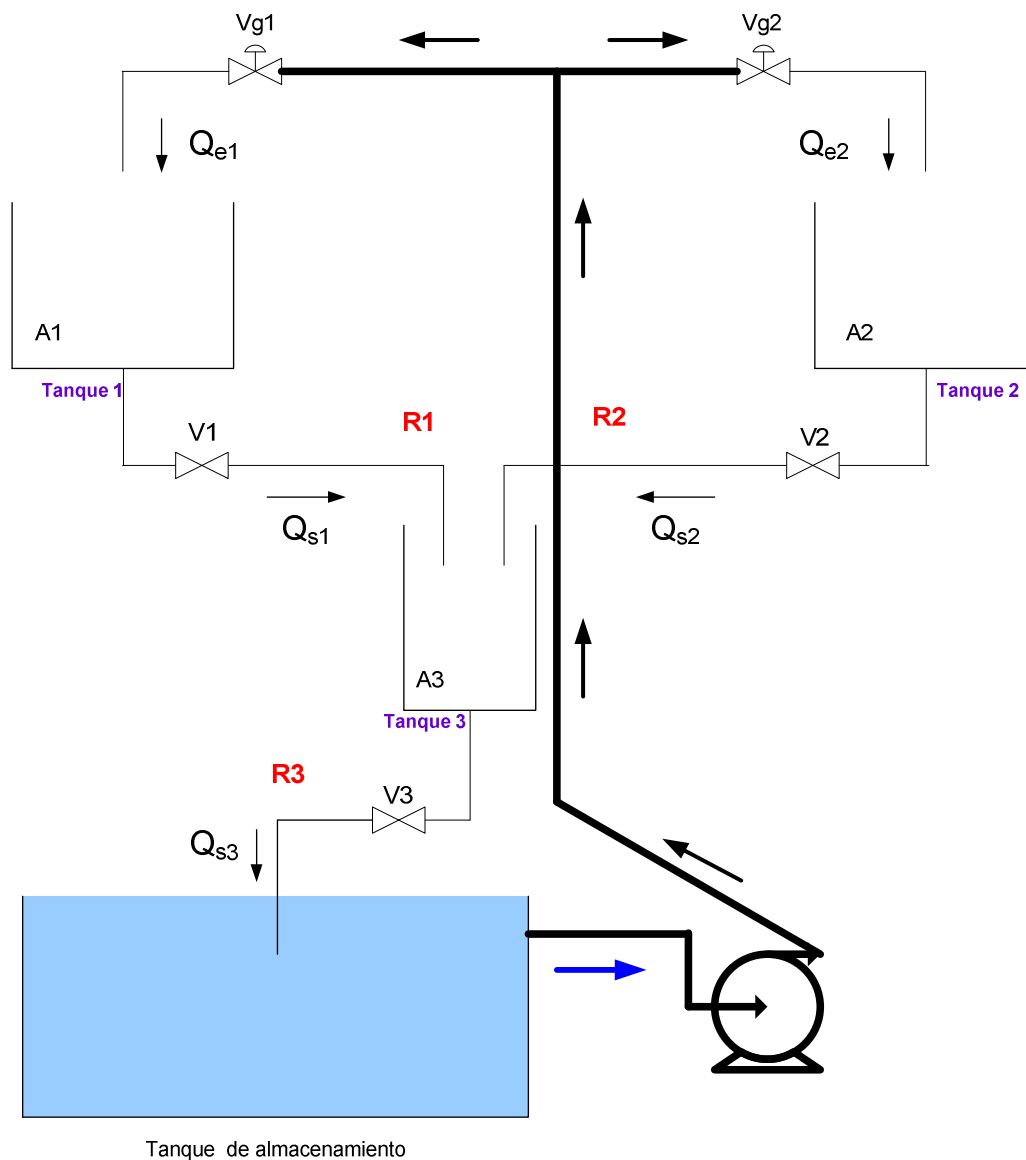


Fig. 3-1. Representación esquemática del sistema físico. Fuente: Propia

Tabla 3-6. Resumen de elementos que intervienen en el sistema. Fuente: Propia.

| Simbología | Elemento |
|------------|--|
| Vg1 | Válvula de globo 1, de 1/2" de diámetro. |
| Vg2 | Válvula de globo 2, de 1/2" de diámetro. |
| A1 | Área transversal del tanque 1 o Capacitancia del tanque 1: 330 mm de diámetro. |
| A2 | Área transversal del tanque 2 o Capacitancia del tanque 2: |

| | |
|----|---|
| | 330 mm de diámetro. |
| A3 | Área transversal del tanque 3 o Capacitancia del tanque 3: 260 mm de diámetro |
| V1 | Válvula manual de compuerta 1, de 1/2" de diámetro |
| V2 | Válvula manual de compuerta 2, de 1/2" de diámetro |
| V3 | Válvula manual de compuerta 3, de 1/2" de diámetro |
| R1 | Suma de resistencias de: <ul style="list-style-type: none"> • Válvula V1. • 322 mm de longitud de tubería de polipropileno monocapa de 1/2" de diámetro. • 2 codos de 90°. ²⁸ • 1 adaptador de 1/2" para tanque ²⁸. • 1 unión R.R. ²⁸ |
| R2 | Suma de resistencias de: <ul style="list-style-type: none"> • Válvula V2. • 248 mm de longitud de tubería de polipropileno monocapa de 1/2" de diámetro. • 2 codos de 90°. ²⁸ • 1 adaptador de 1/2" para tanque ²⁸. • 1 unión R.R. ²⁸ |
| R3 | Suma de resistencias de: <ul style="list-style-type: none"> • Válvula V3. • 175 mm de longitud de tubería de polipropileno monocapa de 1/2" de diámetro. • 2 codos de 90°. ²⁸ • 1 adaptador de 1/2" para tanque. ²⁸ |

3.1.3.2 Determinación del modelo matemático

De los diferentes elementos del sistema se determinan las siguientes ecuaciones:

En el sistema se encuentran:

- Tanques para agua (Ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden).
- 2 Válvulas de globo que son las entradas principales del sistema.

²⁸ Catálogo de Línea Dorada de Plastigama

- 3 tramos de tubería (incluyen válvulas de esfera) que son las salidas de los tanques. Cada tramo presenta una resistencia que relaciona al flujo de salida con la altura del tanque al que está conectado (ecuaciones algebraicas).

$$Q_{s1} - Q_{s1} = A_1 \times \dot{H}_1 \quad (94)$$

$$Q_{s2} - Q_{s2} = A_2 \times \dot{H}_2 \quad (95)$$

$$Q_{s1} + Q_{s2} - Q_{s3} = A_3 \times \dot{H}_3 \quad (96)$$

$$Q_{s1} = \frac{H_1}{R_1} \quad (97)$$

$$Q_{s2} = \frac{H_2}{R_2}$$

$$Q_{s3} = \frac{H_3}{R_3} \quad (98)$$

$$Q_{s1} - \frac{H_1}{R_1} = A_1 \times \dot{H}_1 \quad (99)$$

$$Q_{s2} - \frac{H_2}{R_2} = A_2 \times \dot{H}_2 \quad (100)$$

$$\frac{H_1}{R_1} + \frac{H_2}{R_2} - \frac{H_3}{R_3} = A_3 \times \dot{H}_3 \quad (101)$$

Se cambian las variables, por comodidad de manejo algebraico resultando:

$$Q_{s1} = Q_1 \quad (102)$$

$$Q_{s2} = Q_2 \quad (103)$$

$$A_1 = A_2 = A \quad (104)$$

$$Q_1 - \frac{H_1}{R_1} = A \times \dot{H}_1 \quad (105)$$

$$Q_2 - \frac{H_2}{R_2} = A \times \dot{H}_2 \quad (106)$$

$$\frac{H_1}{R_1} + \frac{H_2}{R_2} - \frac{H_3}{R_3} = A_3 \times \dot{H}_3 \quad (107)$$

Se seleccionan las variables de estado que son variables de estado de primer orden, al tener tres ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden se necesitan establecer tres variables de estado notadas con la letra x y un subíndice

Característico (1, 2 o 3 dependiendo del tanque estudiado), para esto se utiliza el método de variables de estado como variables físicas en donde el nivel del líquido a controlar es la mas representativa, por ser los tanques acumuladores de energía y su variación da idea directa del comportamiento de la energía en el sistema.

$$x_1 = H_1 \quad (108)$$

$$x_2 = H_2 \quad (109)$$

$$x_3 = H_3 \quad (110)$$

Entonces las ecuaciones de estado tienen la siguiente representación:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \rightarrow H(t) = A(t)H(t) + B(t)Q(t) \quad (111)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \rightarrow H(t) = C(t)H(t) + D(t)Q(t) \quad (112)$$

Las matrices correspondientes del sistema presentan las siguientes características:

Tabla 3-7. Características de las matrices del sistema en espacio de estado.

| Matriz | Nomenclatura | Filas | Columnas | Dimensión |
|--------------------------------|--------------|-------|----------|--------------|
| Vector de estado | $\dot{H}(t)$ | 3 | 1 | 3×1 |
| Matriz del sistema o de estado | $A(t)$ | 3 | 3 | 3×3 |
| Matriz de entrada | $B(t)$ | 3 | 2 | 3×2 |
| Vector de entrada | $Q(t)$ | 2 | 1 | 2×1 |
| Vector de salida | $H(t)$ | 3 | 1 | 3×1 |
| Matriz de salida | $C(t)$ | 3 | 3 | 3×3 |
| Matriz de transmisión directa | $D(t)$ | 3 | 2 | 3×2 |
| Vector variables de estado | $x(t)$ | 3 | 1 | 3×1 |

Las matrices del sistema en modelo de espacio de estado son:

$$\begin{bmatrix} \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \\ \dot{H}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{A}{R_2} & 0 \\ \frac{A}{R_1} & \frac{A}{R_2} & -\frac{A_3}{R_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (113)$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (114)$$

3.1.4 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DINÁMICO CON ÁLGEBRA DE BLOQUES

Debido a la complejidad del sistema (2 entradas, 1 salida), por facilidad se recurre a una resolución mediante el método de espacio de estado, y por ende a la siguiente estructura de álgebra de bloques:

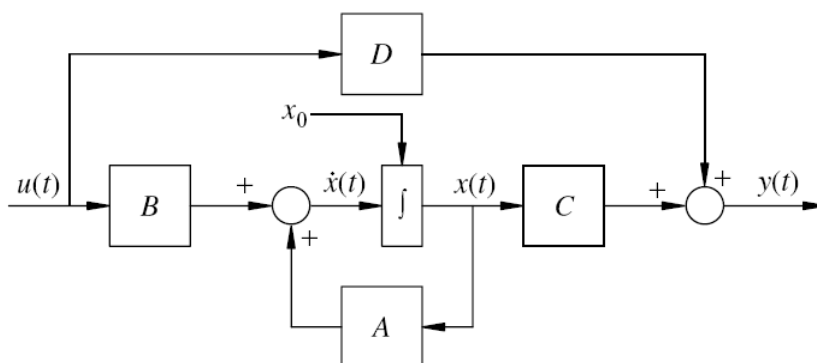


Fig. 3-2. Diagrama de bloques del sistema mediante el método de espacio de estado.

Tabla 3-8. Tabla de resumen de parámetros presentes en el diagrama de bloques

| Parámetro | Representación |
|----------------------------------|---|
| $u(t)$ Vector de entrada | $\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}$ |
| $\dot{x}(t)$ Vector de estado | $\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$ |
| x_0 Perturbaciones | Para este caso no se considerará la existencia de perturbaciones. |
| $x(t)$ | $\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$ |

| | |
|------------------------------------|---|
| y(t) Vector de salida | $\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$ |
| A Matriz del sistema | $A_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -0,0003443 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0001228 & 0 \\ 0,0003443 & 0,0001228 & -6,84 \times 10^{-5} \end{bmatrix}$ |
| B Matriz de entrada | $B_{3 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ |
| C Matriz de salida | $C_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| D Matriz de transmisión directa | $D_{3 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ |

3.1.5 ESTUDIO DEL SISTEMA Y DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MEDIANTE EL USO DE MATLAB.

Debido a la complejidad de este sistema múltiple entrada, múltiple salida (MIMO), se empleó el recurso de archivos *.m para obtener las funciones de transferencias pertinentes.

El archivo .m que se creó es el siguiente:

```
Function y=tanque(a,a3,R1,R2,R3)
A=[-a/R1 0 0;0 -a/R2 0;a/R1 a/R2 -a3/R3]; % Representa la matriz del sistema.
B=[1 0;0 1;0 0]; % Representa la matriz de entrada.
C=[1 0 0;0 1 0;0 0 1]; % Representa la matriz de salida.
D=zeros(3,2); % Representa la matriz de transmisión directa.
sys=ss(A,B,C,D) % Genera un espacio de estado con las matrices A,B,C,D.
```

```

step(sys) % Genera el gráfico de respuesta del sistema ante una entrada tipo
          escalón.
sys1=tf(sys) % Genera las funciones de transferencia del sistema
P=ctrb(sys) % Genera la matriz de controlabilidad P.
rangoP=rank(P) % Determina el rango de la matriz P
Q=obsv(sys) % Genera la matriz de observabilidad Q.
rangoQ=rank(Q) % Determina el tamaño de la matriz Q
rangoA=size(A,1) % Determina el rango de la matriz A. Si el rango de la matriz P
                  es igual al tamaño de la matriz A, el sistema es controlable. Si el
                  rango de la matriz Q es igual al tamaño de la matriz A, el sistema
                  es observable.
MRsys=minreal(sys) % Elimina los estados incontrolables o inobservables del
                   sistema de espacio de estado propuesto, el resultado es de
                   orden menor pero posee las mismas características de
                   respuesta del modelo original del sistema
estabilidad=isstable(sys) % Determina si el sistema es estable (dando el valor 1) o
                          no (dando el valor 0).

```

Donde: a (área del tanque 1 igual al área del tanque 2), a3 (área del tanque 3), R1 (resistencia del tramo 1), R2 (resistencia del tramo 2), R3 (resistencia del tramo 3) son los parámetros variables a introducir.

Debido a que las resistencias del sistema y áreas transversales de los tanques ya fueron adecuadamente comprobadas, se introdujeron estos valores en el programa Matlab, obteniendo los siguientes resultados:

```
y=tanque(0.86,0.56,2642.21,7405.15,9002.64)
```

a =

| | x1 | x2 | x3 |
|----|------------|------------|------------|
| x1 | -0.0003255 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | -0.0001161 | 0 |
| x3 | 0.0003255 | 0.0001161 | -6.22e-005 |

b =

| | u1 | u2 |
|----|----|----|
| x1 | 1 | 0 |
| x2 | 0 | 1 |
| x3 | 0 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 |
|----|----|----|----|
| y1 | 1 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 1 | 0 |
| y3 | 0 | 0 | 1 |

d =

| | u1 | u2 |
|----|----|----|
| y1 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 |

Continuous-time model.

Transfer function from input 1 to output...

#1: $\frac{1}{s + 0.0003255}$

#2: 0

#3: $\frac{0.0003255}{s^2 + 0.0003877 s + 2.025e-008}$

Transfer function from input 2 to output...

#1: 0

#2: $\frac{1}{s + 0.0001161}$

#3: $\frac{0.0001161}{s^2 + 0.0001783 s + 7.224e-009}$

P =

| | | | | | |
|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1.0000 | 0 | -0.0003 | 0 | 0.0000 | 0 |
| 0 | 1.0000 | 0 | -0.0001 | 0 | 0.0000 |
| 0 | 0 | 0.0003 | 0.0001 | -0.0000 | -0.0000 |

rangoP =

3

Q =

| | | |
|---------|---------|---------|
| 1.0000 | 0 | 0 |
| 0 | 1.0000 | 0 |
| 0 | 0 | 1.0000 |
| -0.0003 | 0 | 0 |
| 0 | -0.0001 | 0 |
| 0.0003 | 0.0001 | -0.0001 |
| 0.0000 | 0 | 0 |
| 0 | 0.0000 | 0 |
| -0.0000 | -0.0000 | 0.0000 |

rangoQ =

3

rangoA =

3

a =

| | x1 | x2 | x3 |
|----|------------|------------|------------|
| x1 | -0.0003255 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | -0.0001161 | 0 |
| x3 | 0.0003255 | 0.0001161 | -6.22e-005 |

b =

| | u1 | u2 |
|----|----|----|
| x1 | 1 | 0 |
| x2 | 0 | 1 |
| x3 | 0 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 |
|----|----|----|----|
| y1 | 1 | 0 | 0 |


```

y2 0 1 0
y3 0 0 1
d =
  u1 u2
y1 0 0
y2 0 0
y3 0 0

```

Continuous-time model.

estabilidad = 1

La siguiente figura nos presenta seis gráficas, cada gráfica representa la respuesta de una de las tres salidas del sistema (alturas) por cada entrada (caudal). La altura del tanque 1 está representada por salida 1 (Out 1), la altura del tanque 2 está representada por salida 2 (Out 2), y altura del tanque 3 está representada por salida 3 (Out 3). En cuanto a las entradas, el caudal 1 está representado por entrada 1 (In 1), el caudal 2 está representado por entrada 2 (In 2).

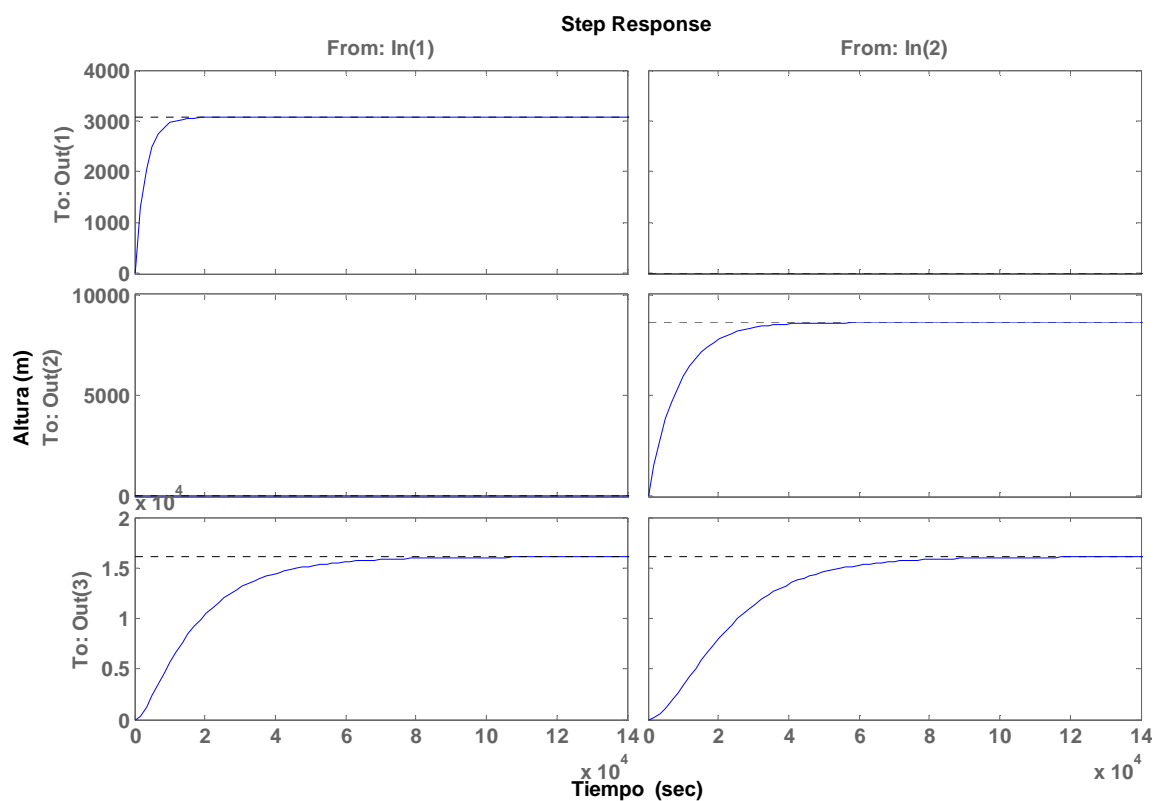


Fig. 3-3. Respuesta del sistema en espacio de estado.

La siguiente tabla presenta un resumen de las funciones de transferencia del sistema encontradas mediante el anterior archivo .m.

Tabla 3-9. Tabla de resumen de funciones de transferencia obtenidas mediante Matlab. Fuente: propia

| # | ENTRADA | SALIDA | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA |
|---|--------------------|----------------------------|--|
| 1 | Caudal 1: Q_{e1} | Altura del tanque 1: H_1 | $\frac{1}{s + 0,0003255}$ |
| 2 | Caudal 1: Q_{e1} | Altura del tanque 2: H_2 | 0 |
| 3 | Caudal 1: Q_{e1} | Altura del tanque 3: H_3 | $\frac{0,0003255}{s^2 + 0,0003877 s + 2,025 \times 10^{-8}}$ |
| 4 | Caudal 2: Q_{e2} | Altura del tanque 1: H_1 | 0 |
| 5 | Caudal 2: Q_{e2} | Altura del tanque 2: H_2 | $\frac{1}{s + 0,0001161}$ |
| 6 | Caudal 2: Q_{e2} | Altura del tanque 3: H_3 | $\frac{0,0001161}{s^2 + 0,0001783 s + 7.224 \times 10^{-9}}$ |

3.2 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

3.2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PID.

Como ya fue mencionado en el punto 1.3.3.2, el control PID es un lazo cerrado o retroalimentado con las señales de salida o respuesta del sistema de planta.

Para aplicar un determinado tipo de control, se requiere conocer: la función de transferencia del sistema de planta, la función de transferencia del sistema de control, el tipo de señal de entrada, un valor de referencia (que corresponde al valor requerido de la salida) y algunos parámetros de diseño tales como: tiempos de subida, de estabilización; porcentaje de error, valor máximo de sobrepicos.

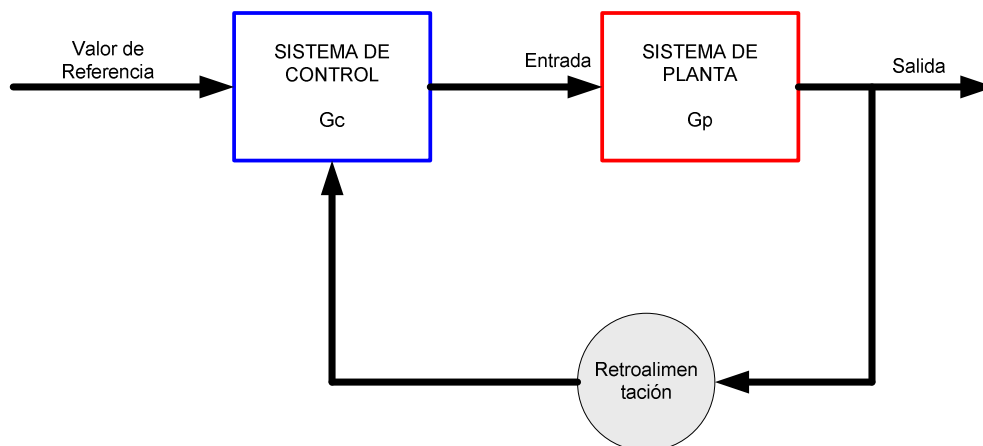


Fig. 3-4. Representación del sistema de control de lazo cerrado. Fuente: propia

La función de transferencia del sistema de control PID es:

$$G_c = k_p + k_d \cdot s + \frac{k_i}{s} \quad (115)$$

Las funciones de transferencia del sistema de planta se encuentran enlistadas en la tabla 3-9.

Se ha considerado que las perturbaciones no alteran en gran medida los resultados del sistema, por lo tanto, la función de transferencia global es:

$$H = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} \quad (116)$$

Donde: $H = \frac{Y(s)}{r(s)} = \frac{\text{salida}}{\text{referencia}}$ (117)

3.2.1.1 Parámetros de diseño y referencia.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros de diseño que se han considerado para el control del sistema:

Tabla 3-10. Tabla de parámetros de diseño

| Parámetro | Tanque 1 | Tanque 2 | Tanque 3 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Referencia [m] | 0,05 | 0,1 | 0,11 |
| Tiempo de subida (T_{sub}) [s] | Entre 35 y 40 | Entre 60 y 70 | Entre 90 y 110 |
| Tiempo de estabilización (T_{est}) [s] | Entre 250 y 265 | Entre 400 y 480 | Entre 680 y 850 |
| Máx % de error | 1 | 1 | 1 |
| Máx sobrepico [m] | 0,004 | 0,004 | 0,004 |

Los tiempos de subida de la anterior tabla fueron considerados según los datos experimentales que se obtuvieron con el funcionamiento dinámico del sistema considerando el máximo caudal. La siguiente tabla muestra estos datos.

Tabla 3-11. Tabla de tiempo de subida a máximo caudal en estado dinámico.

| Nº de Tanque | Referencia [m] | Tiempo de subida [s] |
|--------------|----------------|----------------------|
| 1 | 0.05 | 34,1 |
| 2 | 0.1 | 54,6 |
| 3 | 0.11 | 87,73 |

3.2.1.2 Determinación de los parámetros de control PID (proporcional, diferencial e integral) y las funciones de transferencia globales con la ayuda de MatLab.

Al aplicar la retroalimentación (independientemente) a cada una de las salidas con sus respectivas entradas podemos encontrar cuatro funciones de transferencia con sus respectivos parámetros de control: proporcional (k_p), diferencial (k_d) e integral (k_i).

Para facilitar y automatizar la sintonización de estos parámetros se realizaron los siguientes archivos .m con los cuales se fueron probando valores de k_p , k_d , k_i ; hasta encontrar el conjunto de valores cuyo resultado se acopla de mejor manera a los parámetros de diseño.

- **Entrada 1, Salida 1.**

Archivo .m:

```
function y=pid11(kp,kd,ki,r) % Se deben ir probando valores de kp,
                             kd, ki.
                             "r" es la referencia (parámetro de
                             diseño).
syms gp gc h                % Se generan las expresiones simbólicas:
                             gp, gc, h.
s=tf('s')
gp=1/(s + 0.0003255)        %Se introduce la función de transferencia de
                             planta de la entrada 1, salida 1 (gp).
gc=kp+kd*s+ki/s            %Se introduce la función de transferencia de
                             control PID.
y=gp*gc*r/(1+gp*gc)        %Expresión de la salida aplicando un PID.
H=gp*gc/(1+gp*gc)          %Expresión de la función de transferencia
                             global aplicando un PID.
step (y)                   %Muestra la gráfica de respuesta dinámica
                             del sistema.
```

Prueba 1: `y=pid11(3,10,0.89,0.05)`

$$y = \frac{0.5 s^4 + 0.1502 s^3 + 0.04455 s^2 + 1.532e-005 s}{11 s^4 + 3.004 s^3 + 0.891 s^2 + 0.0003064 s}$$

$$H = \frac{10 s^4 + 3.003 s^3 + 0.891 s^2 + 0.0003064 s}{11 s^4 + 3.004 s^3 + 0.891 s^2 + 0.0003064 s}$$

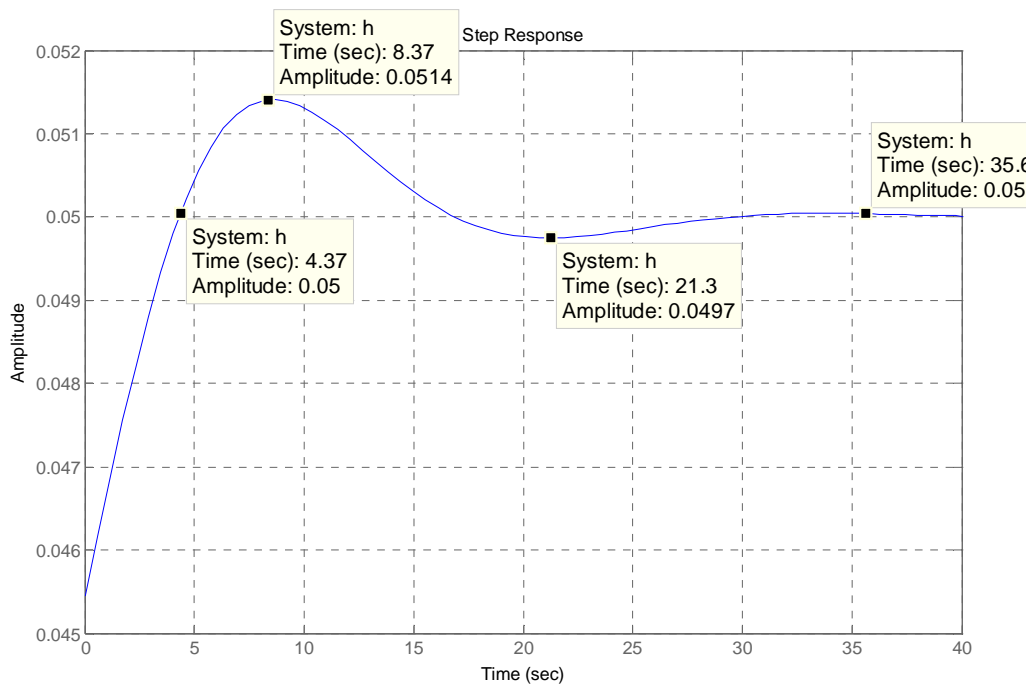


Fig. 3-5. Resultados de la Prueba 1: $k_p = 3$, $k_d = 10$, $k_i = 0,89$. (Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 1).

Prueba 2: $y = \text{pid11}(0.9, 12, 0.01, 0.05)$

$$y = \frac{0.6 s^4 + 0.04521 s^3 + 0.0005155 s^2 + 1.722e-005 s}{13 s^4 + 0.9048 s^3 + 0.01031 s^2 + 3.44e-006 s}$$

$$H = \frac{12 s^4 + 0.9041 s^3 + 0.01031 s^2 + 3.443e-006 s}{13 s^4 + 0.9048 s^3 + 0.01031 s^2 + 3.443e-006 s}$$

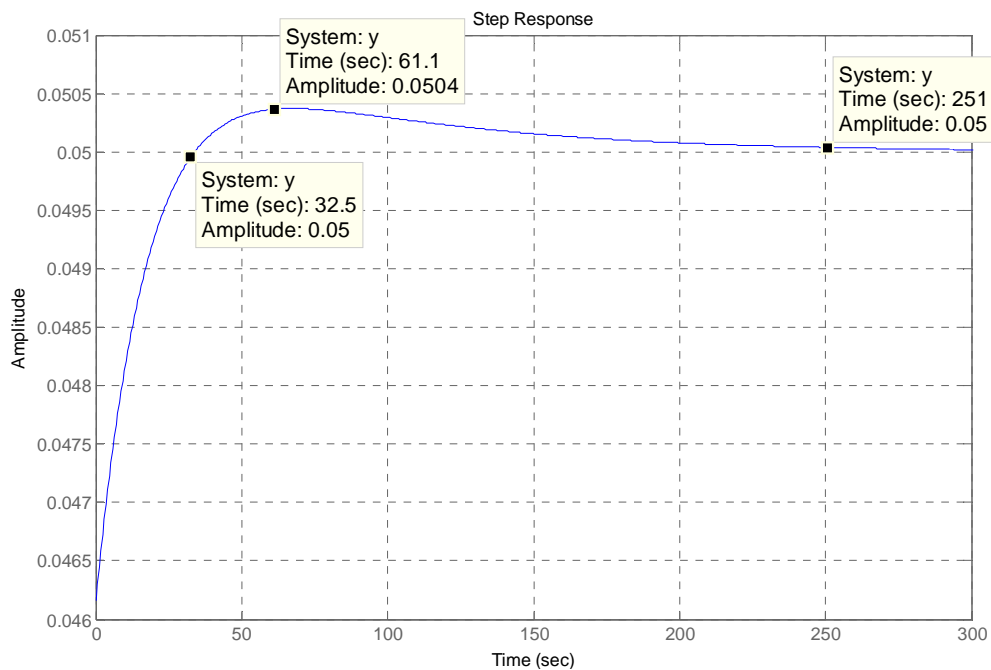


Fig. 3-6. Resultados de la Prueba 2: $k_p = 0.9$, $k_d = 12$, $k_i = 0.01$ (Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 1).

Prueba 3: $y = \text{pid11}(1.7, 25, 0.01, 0.05)$

$$y = \frac{1.25 s^4 + 0.08993 s^3 + 0.0005308 s^2 + 1.722e-007 s}{26 s^4 + 1.799 s^3 + 0.01062 s^2 + 3.44 e-006 s}$$

$$H = \frac{25 s^4 + 1.799 s^3 + 0.01031 s^2 + 3.443e-006 s}{26 s^4 + 1.799 s^3 + 0.01062 s^2 + 3.44 e-006 s}$$

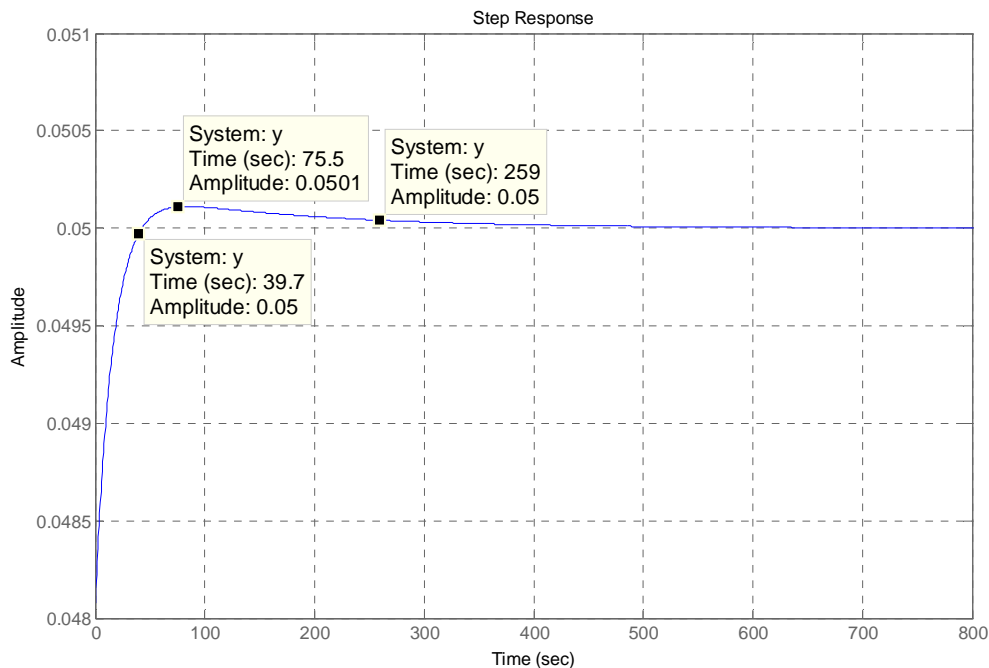


Fig. 3-7. Resultados de la Prueba 3: $k_p = 1.75$, $k_d = 25$, $k_i = 0.01$. (Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 1).

Entre estas tres pruebas, la tercera presenta los resultados esperados dentro de los parámetros de diseño antes determinados.

- **Entrada 2, Salida 2.**

Archivo .m:

```
function y=pid22(kp,kd,ki,r) % Se deben ir probando valores de kp,
                             kd, ki.
                             "r" es la referencia (parámetro de
                             diseño).
syms gp gc h % Se generan las expresiones simbólicas:
              gp, gc, h.
s=tf('s')
gp=1/(s + 0.0001161) %Se introduce la función de transferencia de
                    planta de la entrada 2, salida 2 (gp).
gc=kp+kd*s+ki/s %Se introduce la función de transferencia de
                 control PID.
y=gp*gc*r/(1+gp*gc) % Expresión de la salida aplicando un PID.
H=gp*gc/(1+gp*gc) %Expresión de la función de transferencia
                  global aplicando un PID.
```


step (y)

%Muestra la gráfica de respuesta dinámica del sistema.

Prueba 1: `y=pid22(3,10,0.89,0.1)`

$$y = \frac{s^4 + 0.3001 s^3 + 0.08904 s^2 + 1.033e-005 s}{11 s^4 + 3.001 s^3 + 0.8903 s^2 + 0.0001033 s}$$

$$H = \frac{10 s^4 + 3.001 s^3 + 0.8903 s^2 + 0.0001033 s}{11 s^4 + 3.001 s^3 + 0.8903 s^2 + 0.0001033 s}$$

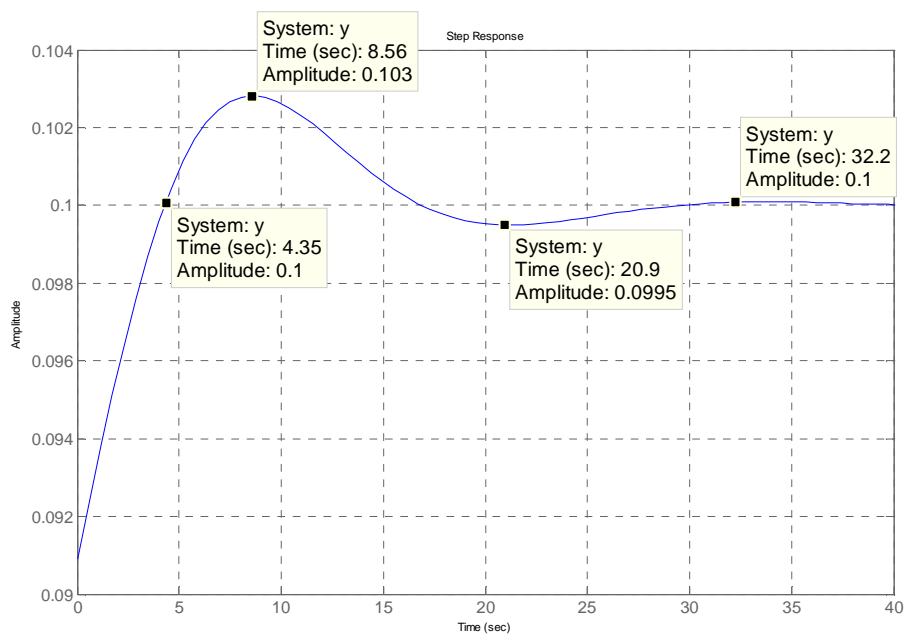


Fig. 3-8. Resultados de la Prueba 1: $k_p = 3$, $k_d = 10$, $k_i = 0,89$. (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 2).

Prueba 2: $y=\text{pid22}(3,7,1.5,0.1)$

$$y = \frac{0.7 s^4 + 0.3001 s^3 + 0.15 s^2 + 1.742e-005 s}{8 s^4 + 3.001 s^3 + 1.5 s^2 + 0.0001742 s}$$

$$H = \frac{7 s^4 + 3.001 s^3 + 1.5 s^2 + 0.0001742 s}{8 s^4 + 3.001 s^3 + 1.5 s^2 + 0.0001742 s}$$

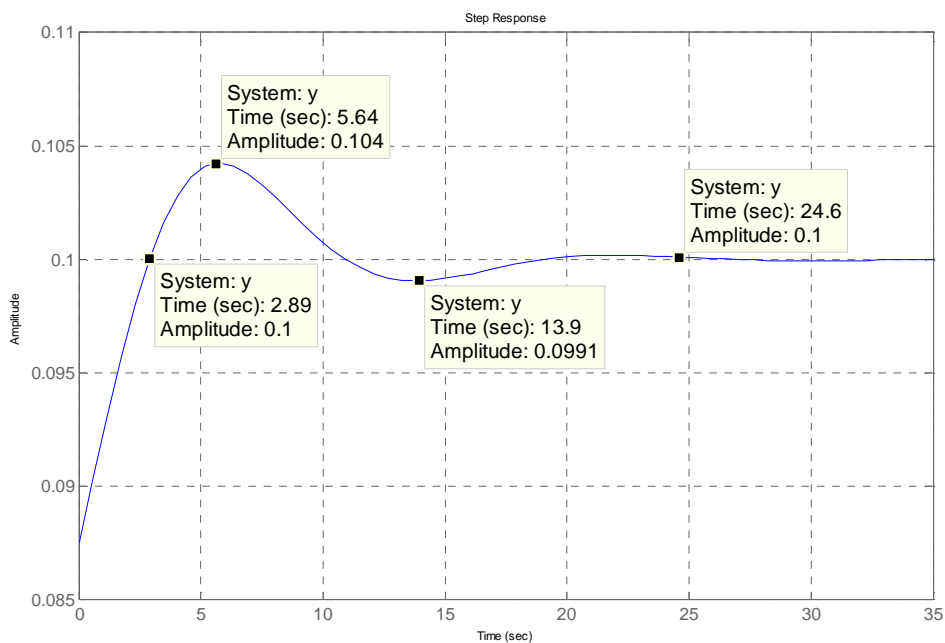


Fig. 3-9. Resultados de la Prueba 2: $k_p = 3$, $k_d = 7$, $k_i = 1.5$. (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 2).

Prueba 3: $y=\text{pid22}(2,50,0.01,0.1)$

$$y = \frac{5 s^4 + 0.2006 s^3 + 0.001023 s^2 + 1.161e-007 s}{51 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161e-006 s}$$

$$H = \frac{50 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161e-006 s}{51 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161 e-006 s}$$

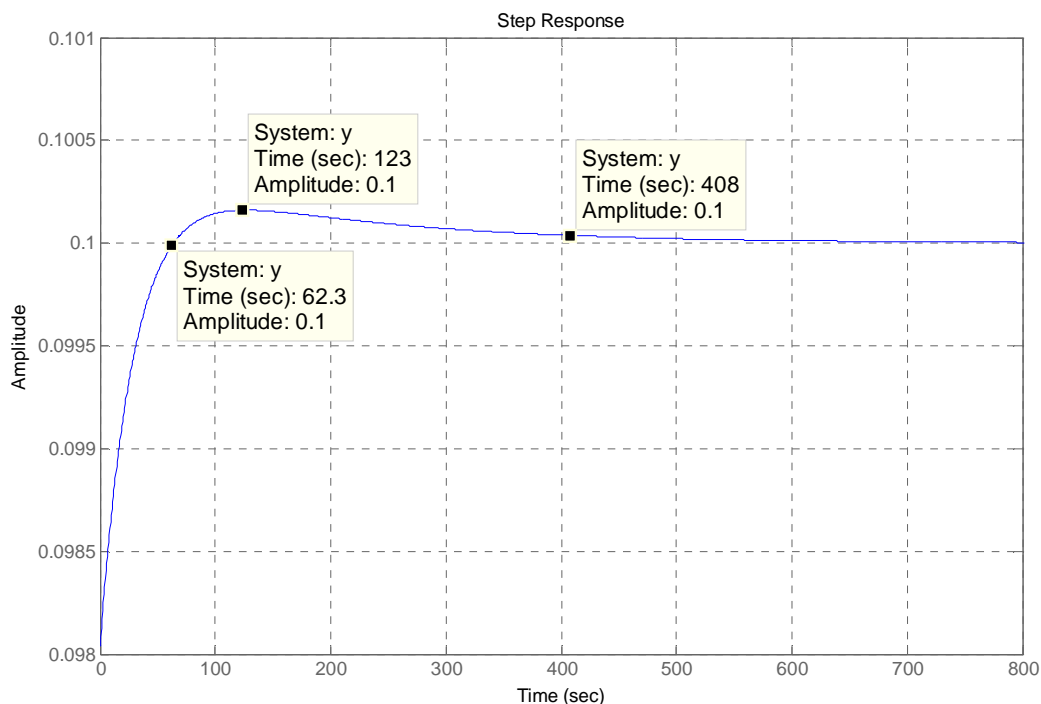


Fig. 3-10. Resultados de la Prueba 3: $k_p = 2$, $k_d = 50$, $k_i = 0.01$. (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 2).

Entre estas tres pruebas, la tercera presenta los resultados esperados dentro de los parámetros de diseño antes determinados.

- **Entrada 1, Salida 3.**

Archivo .m:

```
function y=pid13(kp,kd,ki,r)    % Se deben ir probando valores de kp,
                                kd, ki.
                                "r" es la referencia (parámetro de
                                diseño).

syms gp gc h                  % Se generan las expresiones simbólicas:
                                gp, gc, h.

s=tf('s')
gp=0.0003255/(s^2 + 0.0003877*s + 2.025e-008)
                                %Se introduce la función de transferencia de
                                planta de la entrada 1, salida 3 (gp).
```

```

gc=kp+kd*s+ki/s           %Se introduce la función de transferencia de
                             control PID.
y=gp*gc*r/(1+gp*gc)       % %Expresión de la salida aplicando un PID.
H=gp*gc/(1+gp*gc)         %Expresión de la función de transferencia
                             global aplicando un PID.
step (y)                   %Muestra la gráfica de respuesta dinámica
                             del sistema.

```

Prueba 1: `y=pid13(10,750,0.01,0.11)`

$$y = \frac{0.02685 s^5 + 0.0003685 s^4 + 4.974e-007 s^3 + 1.461e-010 s^2 + 7.251e-015 s}{s^6 + 0.2449 s^5 + 0.00335 s^4 + 4.522e-006 s^3 + 1.328e-009 s^2 + 6.591e-014 s}$$

$$H = \frac{0.2441 s^5 + 0.00335 s^4 + 4.522e-006 s^3 + 1.328e-009 s^2 + 6.591e-014 s}{s^6 + 0.2449 s^5 + 0.00335 s^4 + 4.522e-006 s^3 + 1.328e-009 s^2 + 6.591e-014 s}$$

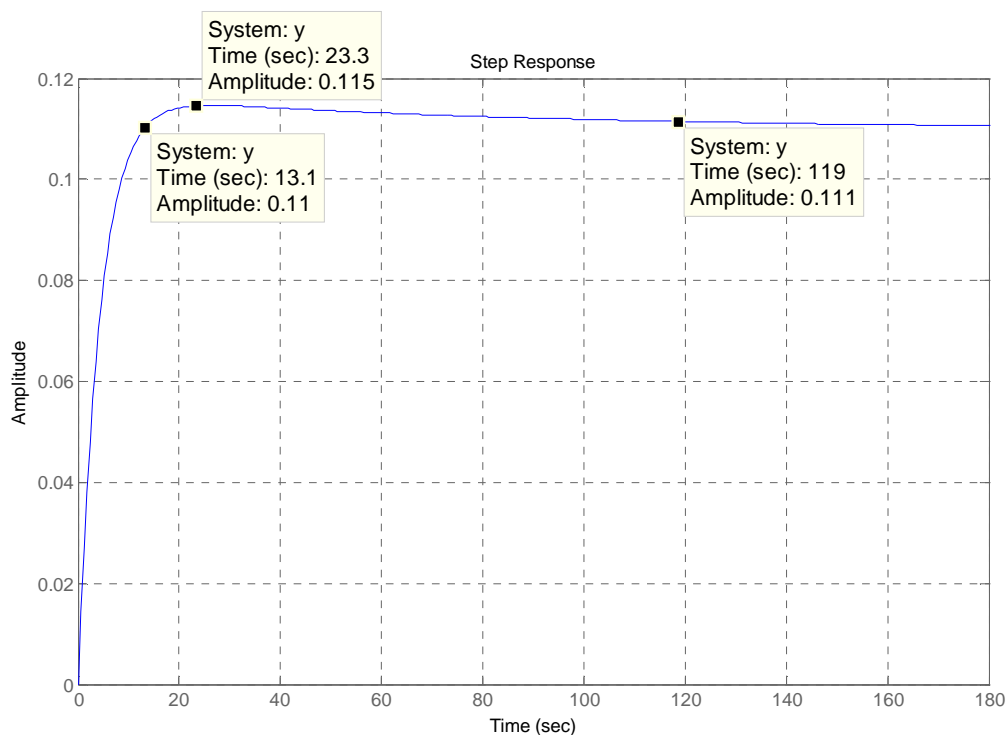


Fig. 3-11. Resultados de la Prueba 1: $k_p = 10$, $k_d = 750$, $k_i = 0,01$. (Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 3).

Prueba 2: $y = \text{pid13}(10, 1350, 0.0001, 0.11)$

$$y = \frac{0.04834 s^5 + 0.0003768 s^4 + 1.434e-007 s^3 + 8.639e-012 s^2 + 7.251e-017 s}{s^6 + 0.4402 s^5 + 0.003426 s^4 + 1.303e-06 s^3 + 7.853e-011 s^2 + 6.591e-016 s}$$

$$H = \frac{0.4394 s^5 + 0.003425 s^4 + 1.303e-006 s^3 + 7.853e-011 s^2 + 6.591e-016 s}{s^6 + 0.4402 s^5 + 0.003426 s^4 + 1.303e-06 s^3 + 7.853e-011 s^2 + 6.591e-016 s}$$

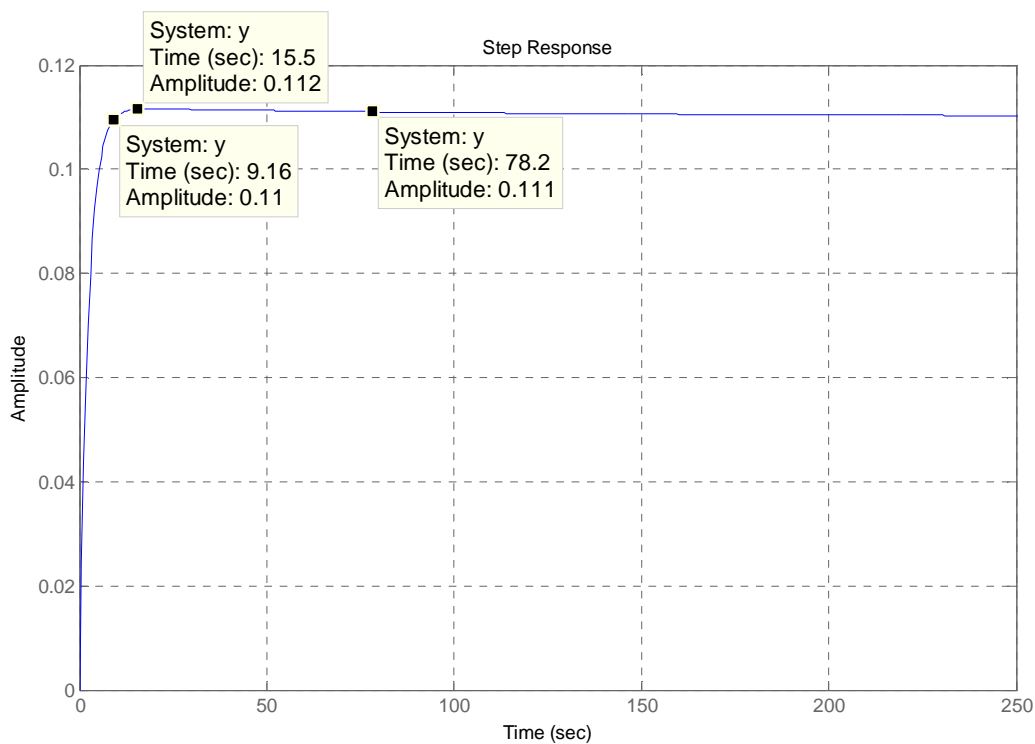


Fig. 3-12. Resultados de la Prueba 2: $k_p = 10$, $k_d = 1350$, $k_i = 1e-4$ (Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 3).

Prueba 3: $y = \text{pid13}(0.21, 102.2, 0.0000000001, 0.11)$

$$y = \frac{0.003659 s^5 + 8.938e-06 s^4 + 2.989e-09 s^3 + 1.523e-013 s^2 + 7.251e-23 s}{s^6 + 0.03404 s^5 + 8.144e-5 s^4 + 2.719e-8 s^3 + 1.385e-12 s^2 + 6.591e-22 s}$$

$$H = \frac{0.03327 s^5 + 8.125e-005 s^4 + 2.717e-008 s^3 + 1.384e-012 s^2 + 6.591e-022 s}{s^6 + 0.03404 s^5 + 8.144e-5 s^4 + 2.719e-8 s^3 + 1.385e-12 s^2 + 6.591e-22 s}$$

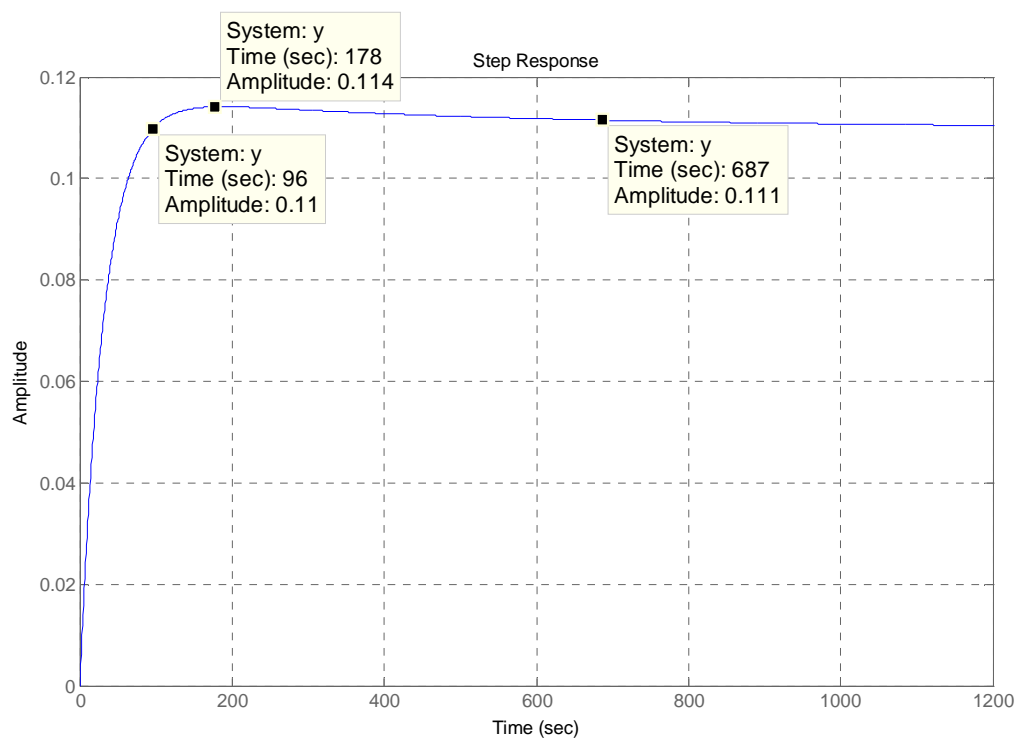


Fig. 3-13. Resultados de la Prueba 3: $k_p = 0.21$, $k_d = 102.2$, $k_i = 1e-10$.

(Sistema a controlar: Entrada 1 – Salida 3).

Entre estas tres pruebas, la tercera presenta los resultados esperados dentro de los parámetros de diseño antes determinados.

- **Entrada 2, Salida 3.**

Archivo .m:

```
function y=pid23(kp,kd,ki,r) % Se deben ir probando valores de kp, kd, ki.
```

```

                                "r" es la referencia (parámetro de
                                diseño).
syms gp gc h                    % Se generan las expresiones simbólicas:
                                gp, gc, h.
s=tf('s')
gp=0.0001161/(s^2 + 0.0001783*s + 7,224e-009)
                                %Se introduce la función de transferencia de
                                planta de la entrada 2, salida 3 (gp).
gc=kp+kd*s+ki/s                %Se introduce la función de transferencia de
                                control PID.
y=gp*gc*r/(1+gp*gc)            % %Expresión de la salida aplicando un PID.
H=gp*gc/(1+gp*gc)              %Expresión de la función de transferencia
                                global aplicando un PID.
step (y)                        %Muestra la gráfica de respuesta dinámica
                                del sistema.

```

Prueba 1: $y = \text{pid23}(10,750,0.01,0.11)$

$$y = \frac{0.009578 s^5 + 0.0001294 s^4 + 1.505 e-007 s^3 + 2.396e-011 s^2 + 9.22e-016 s}{s^6 + 0.08743 s^5 + 0.001177 s^4 + 1.369e-6 s^3 + 2.154e-10 s^2 + 8.382e-15 s}$$

$$H = \frac{0.08708 s^5 + 0.001177 s^4 + 1.369e-006 s^3 + 2.154e-010 s^2 + 8.382e-015 s}{s^6 + 0.08743 s^5 + 0.001177 s^4 + 1.369e-6 s^3 + 2.154e-10 s^2 + 8.382e-15 s}$$

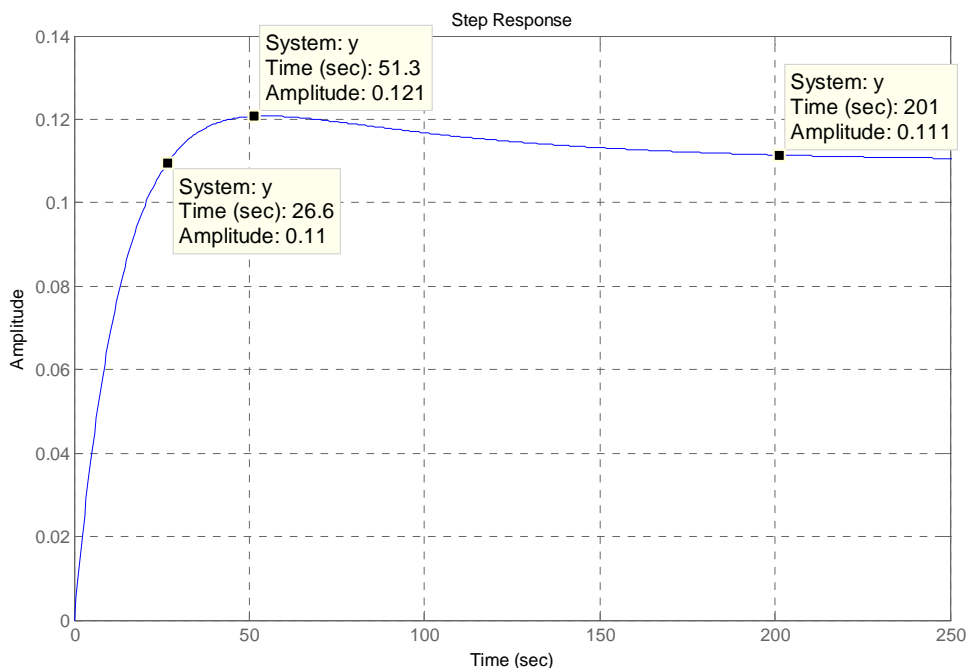


Fig. 3-14. Resultados de la Prueba 1: $k_p = 10$, $k_d = 750$, $k_i = 0,01$. (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 3).

Prueba 2: $y = \text{pid23}(50, 2000, 0.01, 0.11)$

$$y = \frac{0.02554 s^5 + 0.0006431 s^4 + 2.417e-007 s^3 + 2.738e-011 s^2 + 9.221e-016 s}{s^6 + 0.2326 s^5 + 0.005846 s^4 + 2.198e-06 s^3 + 2.489e-010 s^2 + 8.382e-15 s}$$

$$H = \frac{0.2322 s^5 + 0.005846 s^4 + 2.198e-006 s^3 + 2.489e-010 s^2 + 8.382e-015 s}{s^6 + 0.2326 s^5 + 0.005846 s^4 + 2.198e-06 s^3 + 2.489e-010 s^2 + 8.382e-15 s}$$

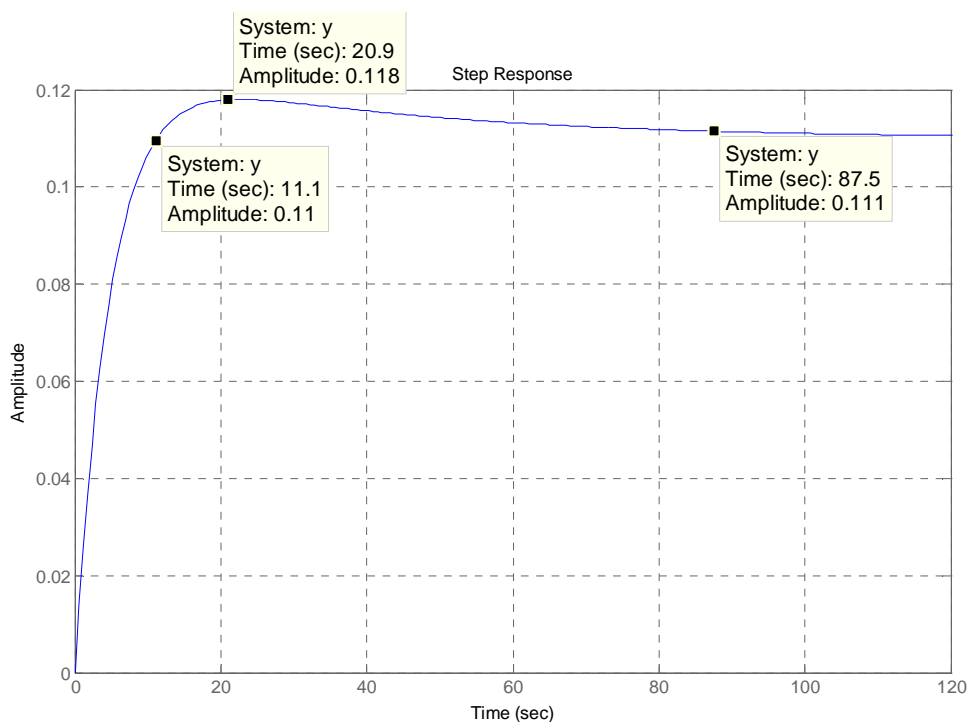


Fig. 3-15. Resultados de la Prueba 2: $k_p = 50$, $k_d = 2000$, $k_i = 0,01$. (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 3)

Prueba 3: $y = \text{pid23}(0.45, 250, 0.000001, 0.11)$

$$y = \frac{0.003193 s^5 + 6.316e-006 s^4 + 1.061e-009 s^3 + 4.377e-014 s^2 + 9.221e-20 s}{s^6 + 0.02938 s^5 + 5.747e-05 s^4 + 9.644e-09 s^3 + 3.98e-13 s^2 + 8.382e-19 s}$$

$$H = \frac{0.02903 s^5 + 5.742e-005 s^4 + 9.641e-009 s^3 + 3.979e-013 s^2 + 8.382e-019 s}{s^6 + 0.02938 s^5 + 5.747e-05 s^4 + 9.644e-09 s^3 + 3.98e-13 s^2 + 8.382e-19 s}$$

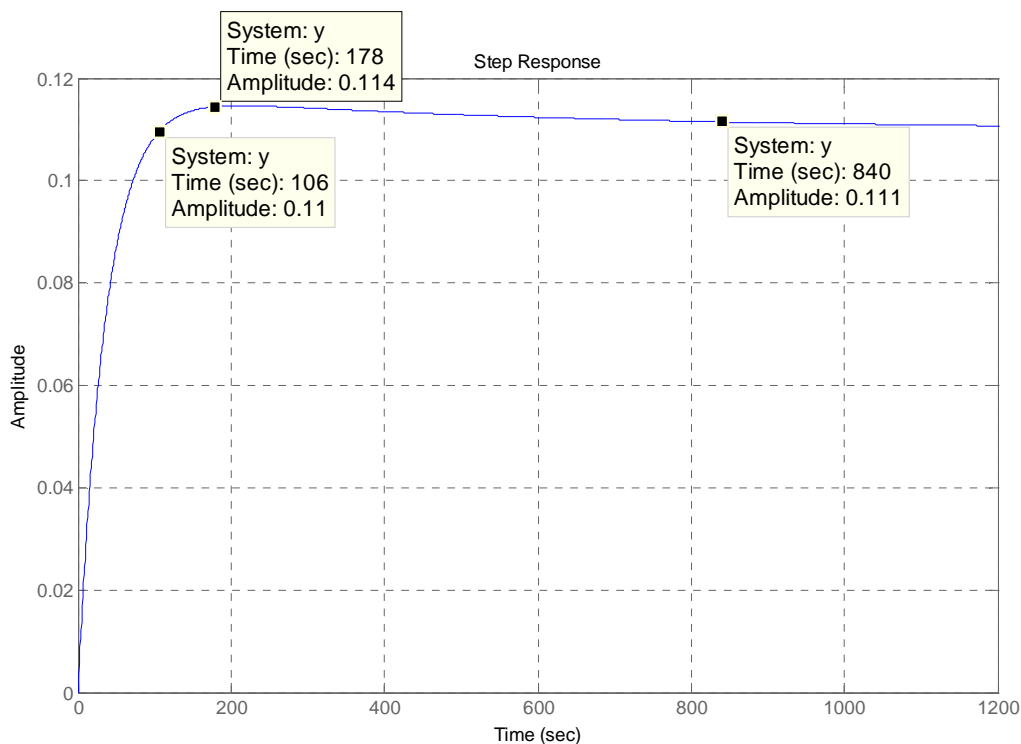


Fig. 3-16. Resultados de la Prueba 3: $k_p = 0.45$, $k_d = 250$, $k_i = 1e-6$ (Sistema a controlar: Entrada 2 – Salida 3)

Entre estas tres pruebas, la tercera presenta los resultados esperados dentro de los parámetros de diseño antes determinados.

Valores escogidos:

Tabla 3-12. Tabla de los valores sintonizados de k_p , k_d , k_i ; con sus respectivos parámetros de diseño.

| Entrada #, Salida # | Ref. [m] | K_p | K_d | k_i | $T_{sub.}$ [s] | $T_{est.}$ [s] | % error | Sobrepico [m] |
|---------------------|----------|-------|-------|-------|----------------|----------------|---------|---------------|
| Entrada 1, Salida 1 | 0,5 | 1,7 | 25 | 0,01 | 39,7 | 259 | 0 | 0,0001 |
| Entrada 2, Salida 2 | 0,1 | 2 | 50 | 0,01 | 62,3 | 408 | 0 | 0 |
| Entrada 1, Salida 3 | 0,11 | 0,21 | 102,2 | 1e-10 | 96 | 687 | 1 | 0,004 |
| Entrada 2, Salida 3 | 0,11 | 0,45 | 250 | 1e-6 | 106 | 840 | 1 | 0,004 |

3.2.1.3 Funciones de transferencia globales:

Entrada 1, Salida 1:

$$H = \frac{25s^4 + 1,799s^3 + 0,01031s^2 + 3,443 \times 10^{-6}s}{26s^4 + 1,799s^3 + 0,01062s^2 + 3,44 \times 10^{-6}s}$$

Entrada 2, Salida 2:

$$H = \frac{50s^4 + 2,006s^3 + 0,01023s^2 + 1,161 \times 10^{-6}s}{51s^4 + 2,006s^3 + 0,01023s^2 + 1,161 \times 10^{-6}s}$$

Entrada 1, Salida 3:

$$H = \frac{0,03327s^5 + 8,125 \times 10^{-5}s^4 + 2,717 \times 10^{-8}s^3 + 1,384 \times 10^{-12}s^2 + 6,591 \times 10^{-22}s}{s^6 + 0,03404s^5 + 8,144 \times 10^{-5}s^4 + 2,719 \times 10^{-8}s^3 + 1,385 \times 10^{-12}s^2 + 6,591 \times 10^{-22}s}$$

Entrada 2, Salida 3:

$$H = \frac{0,02903s^5 + 5,742 \times 10^{-5}s^4 + 9,641 \times 10^{-9}s^3 + 3,979 \times 10^{-13}s^2 + 8,382 \times 10^{-19}s}{s^6 + 0,02938s^5 + 5,747 \times 10^{-5}s^4 + 9,644 \times 10^{-9}s^3 + 3,98 \times 10^{-13}s^2 + 8,382 \times 10^{-19}s}$$

Estas funciones de transferencia son el resultado del control de cada uno de los 4 conjuntos de entrada – salida (por separado). Es decir, de las funciones de transferencia de planta dadas por la resolución del sistema en espacio de estado gracias a Matlab, y de la función de transferencia de control (específicamente PID), se obtuvieron 4 nuevas funciones de transferencia que presentan el sistema controlado con PID, pero no representan el sistema global, sino subsistemas con una entrada y una salida.

3.2.1.4 Análisis de la respuesta del sistema controlado

Una vez obtenidas las 4 funciones de transferencia individuales (sistemas controlados), se procedió a introducirlas en el anterior espacio de estado. Por

ejemplo, en el caso de la entrada 1 - salida 1, se tomó su nueva función de transferencia (controlada) y con las demás funciones de transferencia arrojadas por la resolución anterior de espacio de estado (entrada 1 – salida 2, entrada 1 – salida 3, entrada 2 –salida 1, entrada 2 – salida 2 y entrada 2 – salida 2) se creó un nuevo espacio de estado con un solo conjunto de entrada - salida controlado, en este caso de la entrada 1 – salida 1.

Para encontrar estos nuevos sistemas en espacio de estado, se recurrió nuevamente a los archivos .m, obteniendo lo siguiente:

Sistema controlado: Entrada 1 – Salida 1.

- Archivo .m:

```
function y=cerrado11(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j)
syms num den sys1 sys2
num={[a b c d e];[0];[0.0003255];[0];[1];[0.0001161]}
den={[f g h i j];[1];[1 0.0003877 2.025e-8];[1];[1 0.0001161];[1 0.0001783 7.224e-9]}
sys1=tf(num,den)
sys2=ss(sys1)
step(sys1)
```

```
y=cerrado11(25,1.799,0.01031,3.443e-6,26,1.799,0.01062,3.44e-6)
```

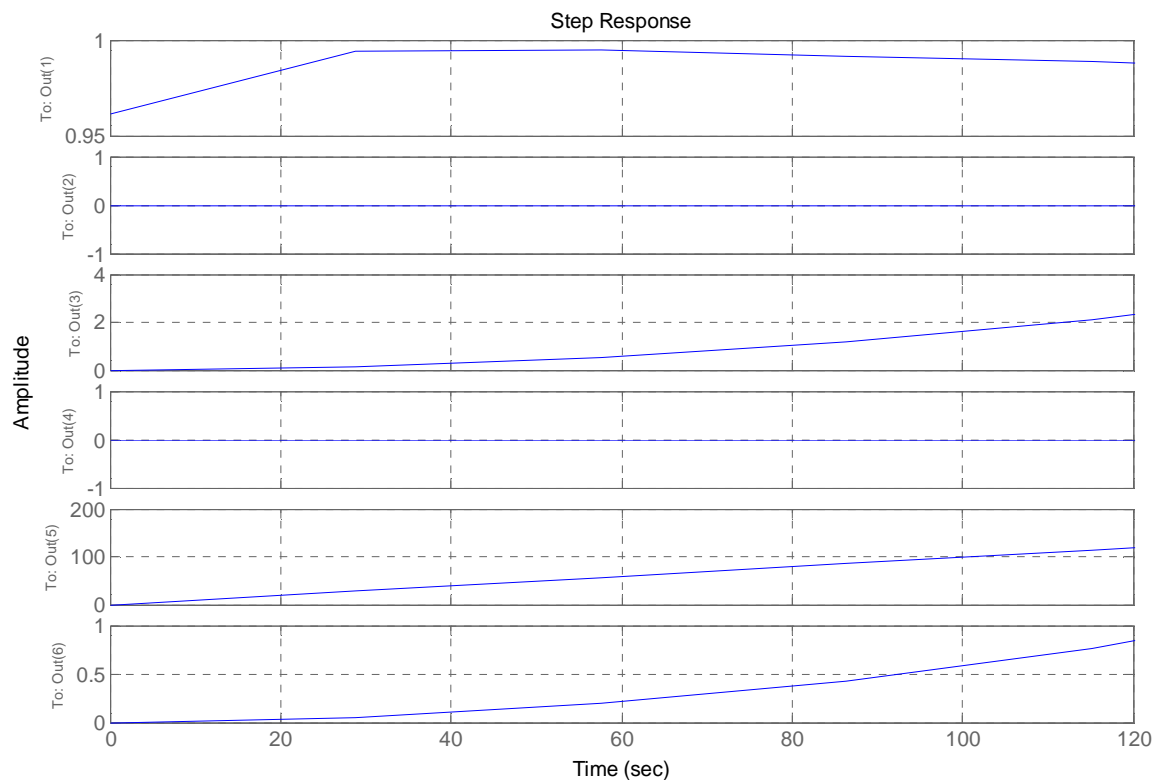


Fig. 3-17. Respuesta a una entrada tipo escalón del sistema múltiple entrada, múltiple salida. Out(1) es el sistema de caudal 1 – altura 1, Out(2) es el sistema de caudal 1 – altura 2, Out(3) es el sistema de caudal 1 – altura 3, Out(4) es el sistema de caudal 2 – altura 1, Out(5) es el sistema de caudal 2 – altura 2, Out(6) es el sistema de caudal 2 – altura 3. Donde únicamente el sistema caudal 1 – altura 1 ha sido controlado mediante PID.

Funciones de transferencia:

Transfer function from input to output...

$$25 s^4 + 1.799 s^3 + 0.01031 s^2 + 3.443e-006 s$$

#1: -----

$$26 s^4 + 1.799 s^3 + 0.01062 s^2 + 3.44e-006 s$$

#2: 0

0.0003255

#3: -----

$$s^2 + 0.0003877 s + 2.025e-008$$

#4: 0

1

#5: -----

$$s + 0.0001161$$

0.0001161

#6: -----

$$s^2 + 0.0001783 s + 7.224e-009$$

Matrices de espacio de estado:

a =

| | x1 | x2 | x3 | x4 | |
|----|----------|----------|------------|----|----|
| x1 | -0.06919 | -0.01307 | -0.0005419 | | -0 |
| x2 | 0.03125 | 0 | 0 | 0 | |
| x3 | 0 | 0.007813 | 0 | 0 | |
| x4 | 0 | 0 | 0.01563 | 0 | |
| x5 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| x6 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| x7 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| x8 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| x9 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | x5 | x6 | x7 | x8 | |
| x1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| x2 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| | | | | |
|----|------------|------------|------------|------------|
| x3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | -0.0003877 | -0.0001659 | 0 | 0 |
| x6 | 0.0001221 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | -0.0001161 | 0 |
| x8 | 0 | 0 | 0 | -0.0001783 |
| x9 | 0 | 0 | 0 | 6.104e-005 |

| | |
|----|------------|
| | x9 |
| x1 | 0 |
| x2 | 0 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0 |
| x5 | 0 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | -0.0001184 |
| x9 | 0 |

b =

| | |
|----|--------|
| | u1 |
| x1 | 0.0625 |
| x2 | 0 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0 |
| x5 | 2 |
| x6 | 0 |
| x7 | 1 |
| x8 | 1 |
| x9 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 | x4 | |
|----|---------|----------|-----------|----|---|
| y1 | 0.04258 | 0.001939 | 0.0003411 | | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| y3 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| | x5 | x6 | x7 | x8 |
|----|----|-------|----|----|
| y1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 1.333 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x9 |
|----|-------|
| y1 | 0 |
| y2 | 0 |
| y3 | 0 |
| y4 | 0 |
| y5 | 0 |
| y6 | 1.902 |

d =

| | u1 |
|----|--------|
| y1 | 0.9615 |
| y2 | 0 |
| y3 | 0 |
| y4 | 0 |

y5 0
y6 0

Sistema controlado: Entrada 2 - Salida 2.

- Archivo .m:

```
function y=cerrado22(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j)
```

```
syms num den sys1 sys2
```

```
num={ [1]; [0]; [0.0003255]; [0]; [a b c d e]; [0.0001161] }
```

```
den={ [1 0.0003255]; [1]; [1 0.0003877 2.025e-8]; [1]; [f g h i j]; [1 0.0001783 7.224e-9] }
```

```
sys1=tf(num,den)
```

```
sys2=ss(sys1)
```

```
step(sys1)
```

```
y=cerrado11(25,1.799,0.01031,3.443e-6,0,26,1.799,0.01062,3.44e-6,0)
```

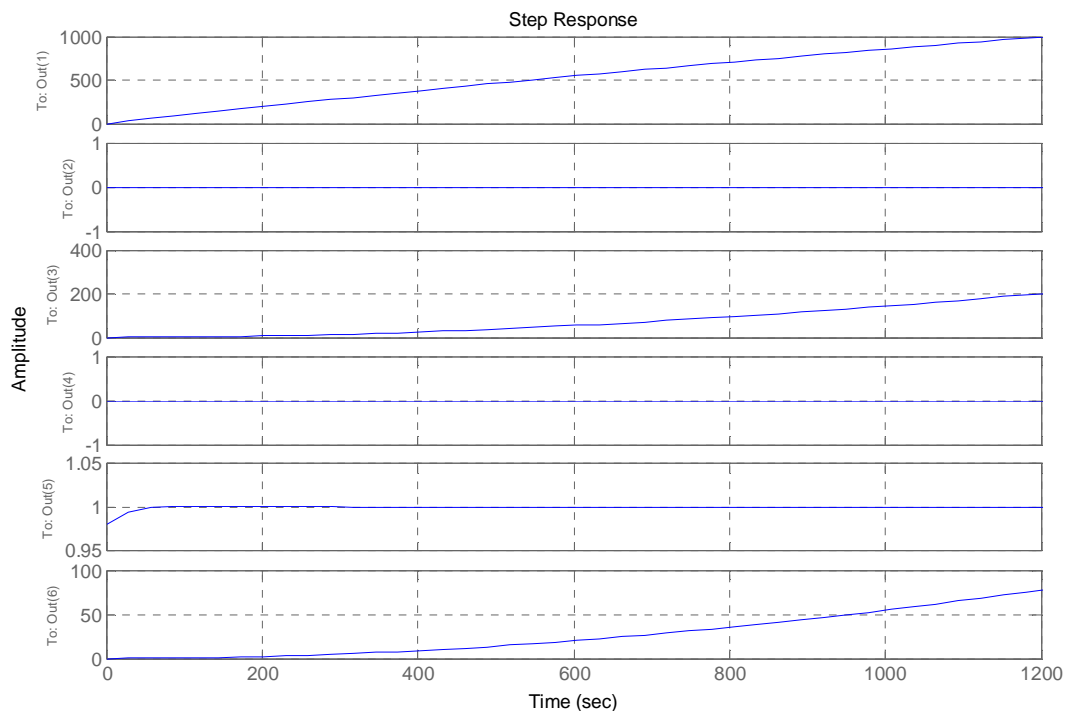


Fig. 3-18. Respuesta a una entrada tipo escalón del sistema múltiple entrada, múltiple salida. Out(1) es el sistema de caudal 1 – altura 1, Out(2) es el sistema de caudal 1 – altura 2, Out(3) es el sistema de caudal 1 –

altura 3, Out(4) es el sistema de caudal 2 – altura 1, Out(5) es el sistema de caudal 2 – altura 2, Out(6) es el sistema de caudal 2 – altura 3. Donde únicamente el sistema caudal 2 – altura 2 ha sido controlado mediante PID

Funciones de Transferencia:

Transfer function from input to output...

$$\#1: \frac{1}{s + 0.0003255}$$

#2: 0

$$\#3: \frac{0.0003255}{s^2 + 0.0003877 s + 2.025e-008}$$

#4: 0

$$50 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161e-006 s$$

$$\#5: \frac{50 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161e-006 s}{51 s^4 + 2.006 s^3 + 0.01023 s^2 + 1.161e-006 s}$$

$$\#6: \frac{0.0001161}{s^2 + 0.0001783 s + 7.224e-009}$$

Matrices de Espacio de Estado:

a =

x1 x2 x3

| | | | |
|----|------------|------------|------------|
| x1 | -0.0003255 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | -0.0003877 | -0.0001659 |
| x3 | 0 | 0.0001221 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | 0 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |

| | x4 | x5 | x6 |
|----|----------|----------|-------------|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | 0 | 0 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | -0.03933 | -0.01284 | -9.324e-005 |
| x5 | 0.01563 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0.01563 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0.03125 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |

| | x7 | x8 | x9 |
|----|----|------------|------------|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | 0 | 0 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | -0 | 0 | 0 |
| x5 | 0 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0 | -0.0001783 | -0.0001184 |
| x9 | 0 | 6.104e-005 | 0 |

b =

| | u1 |
|----|---------|
| x1 | 1 |
| x2 | 2 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0.03125 |
| x5 | 0 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | 1 |
| x9 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 | x4 |
|----|----|----|-------|---------|
| y1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 | 1.333 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 0.02468 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x5 | x6 | x7 | x8 |
|----|----------|------------|----|----|
| y1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0.008055 | 5.851e-005 | 0 | 0 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x9 |
|----|-------|
| y1 | 0 |
| y2 | 0 |
| y3 | 0 |
| y4 | 0 |
| y5 | 0 |
| y6 | 1.902 |

d =

| | u1 |
|----|--------|
| y1 | 0 |
| y2 | 0 |
| y3 | 0 |
| y4 | 0 |
| y5 | 0.9804 |
| y6 | 0 |

Sistema controlado: Entrada 1 - Salida 3.

- Archivo .m:

```
function y=cerrado13(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m)
syms num den sys1 sys2
num={[1];[0];[a b c d e f];[0];[1];[0.0001161]}
den={[1 0.0003255];[1];[g h i j k l m];[1];[1 0.0001161];[1 0.0001783 7.224e-9]}
sys1=tf(num,den)
sys2=ss(sys1)
step(sys1)

y=cerrado13(0.03327,8.125e-5,2.717e-8,1.384e-12,6.591e-22,0,1,0.03404,8.144e-
5,2.719e-8,1.385e-12,6.591e-22,0)
```

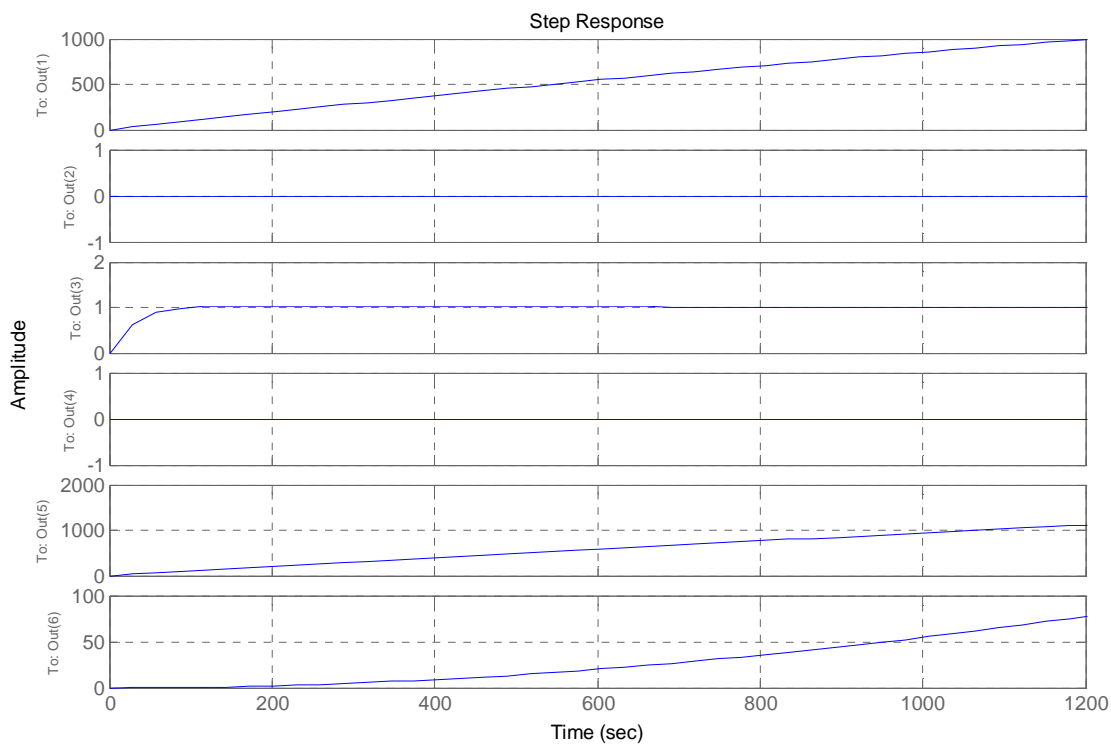


Fig. 3-19. Respuesta a una entrada tipo escalón del sistema múltiple entrada, múltiple salida. Out(1) es el sistema de caudal 1 – altura 1, Out(2) es el sistema de caudal 1 – altura 2, Out(3) es el sistema de caudal 1 – altura 3, Out(4) es el sistema de caudal 2 – altura 1, Out(5) es el sistema de caudal 2 – altura 2, Out(6) es el sistema de caudal 2 – altura 3. Donde únicamente el sistema caudal 1 – altura 3 ha sido controlado mediante PID

Funciones de Transferencia:

Transfer function from input to output...

1

#1: -----

$s + 0.0003255$

#2: 0

$0.03327 s^5 + 8.125e-005 s^4 + 2.717e-008 s^3 + 1.384e-012 s^2 + 6.591e-022 s$

#3: -----

$s^6 + 0.03404 s^5 + 8.144e-05 s^4 + 2.719e-08 s^3 + 1.385e-012 s^2 + 6.591e-022 s$

#4: 0

1

#5: -----

$s + 0.0001161$

0.0001161

#6: -----

$s^2 + 0.0001783 s + 7.224e-009$

Matrices de Espacio de Estado:

a =

| | x1 | x2 | x3 |
|-----|------------|----------|----------|
| x1 | -0.0003255 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | -0.03404 | -0.01042 |
| x3 | 0 | 0.007813 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0.003906 |
| x5 | 0 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |
| x10 | 0 | 0 | 0 |

| | x4 | x5 | x6 |
|----|-----------|-------------|-------------|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | -0.000891 | -5.809e-006 | -1.769e-013 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | 0.007813 | 0 | 0 |

| | | | |
|-----|---|---------|---------|
| x6 | 0 | 0.01563 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0.03125 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |
| x10 | 0 | 0 | 0 |

| | x7 | x8 | x9 |
|-----|----|------------|------------|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | -0 | 0 | 0 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | 0 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0 | -0.0001161 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | -0.0001783 |
| x10 | 0 | 0 | 6.104e-005 |

| | x10 |
|-----|------------|
| x1 | 0 |
| x2 | 0 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0 |
| x5 | 0 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | 0 |
| x9 | -0.0001184 |
| x10 | 0 |

b =

| | u1 |
|-----|------|
| x1 | 1 |
| x2 | 0.25 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0 |
| x5 | 0 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | 1 |
| x9 | 1 |
| x10 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 | x4 |
|----|----|--------|--------|----------|
| y1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0.1331 | 0.0416 | 0.003561 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x5 | x6 | x7 | x8 |
|----|--------|-------|----|----|
| y1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 2.3e-5 | 7e-13 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x9 | x10 |
|----|----|-------|
| y1 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 |
| y6 | 0 | 1.902 |

d =

```

    u1
y1  0
y2  0
y3  0
y4  0
y5  0
y6  0

```

Sistema controlado: Entrada 2 - Salida 3.

- Archivo .m:

```

function y=cerrado23(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m)
syms num den sys1 sys2
num={ [1]; [0]; [0.0003255]; [0]; [1]; [a b c d e f] }
den={ [1 0.0003255]; [1]; [1 0.0003877 2.025e-8]; [1]; [1 0.0001161]; [g h i j k l m] }
sys1=tf(num,den)
sys2=ss(sys1)
step(sys1)

y=cerrado23(0.02903,5.742e-5,9.641e-9,3.979e-13,8.382e-19,0,1,0.02938,5.747e-
5,9.644e-9,3.98e-13,8.382e-19,0)

```

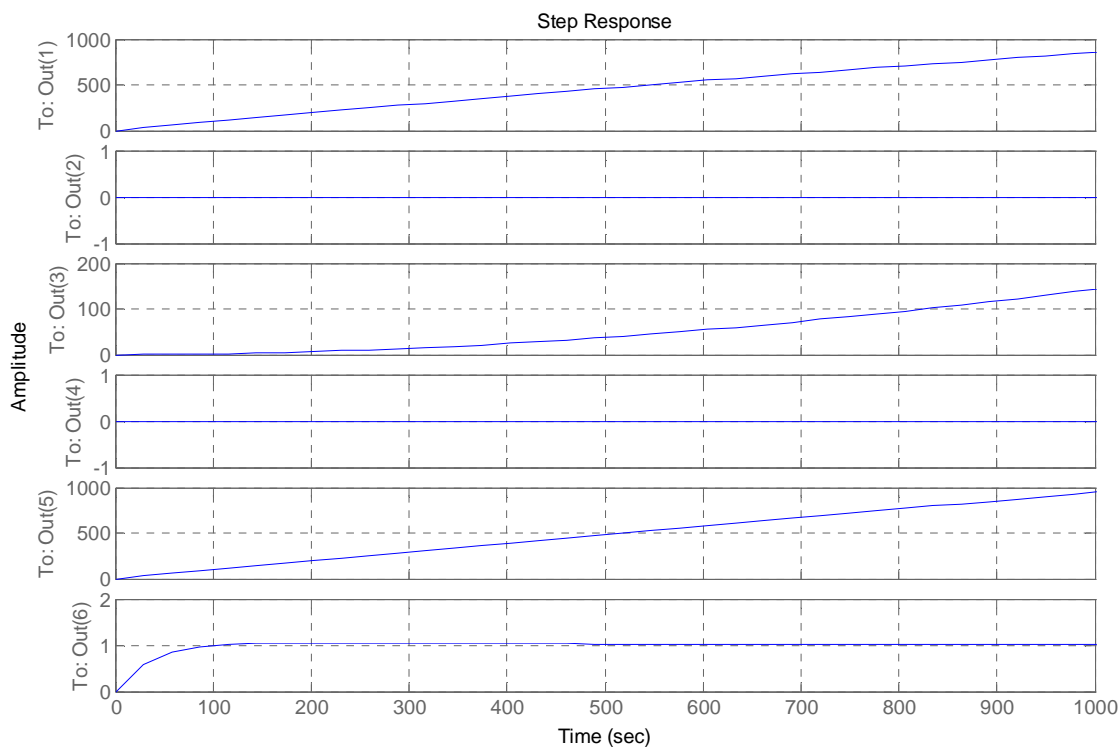


Fig. 3-20. Respuesta a una entrada tipo escalón del sistema múltiple entrada, múltiple salida. Out(1) es el sistema de caudal 1 – altura 1, Out(2) es el sistema de caudal 1 – altura 2, Out(3) es el sistema de caudal 1 – altura 3, Out(4) es el sistema de caudal 2 – altura 1, Out(5) es el sistema de caudal 2 – altura 2, Out(6) es el sistema de caudal 2 – altura 3. Donde únicamente el sistema caudal 2 – altura 3 ha sido controlado mediante PID

Funciones de Transferencia:

Transfer function from input to output...

1

#1: -----

$s + 0.0003255$

#2: 0

0.0003255

#3: -----

$s^2 + 0.0003877 s + 2.025e-008$

#4: 0

1

#5: -----

$s + 0.0001161$

$0.02903 s^5 + 5.742e-005 s^4 + 9.641e-009 s^3 + 3.979e-013 s^2 + 8.382e-019 s$

#6: -----

$s^6 + 0.02938 s^5 + 5.747e-05 s^4 + 9.644e-009 s^3 + 3.98e-013 s^2 + 8.382e-019 s$

Matrices de Espacio de Estado:

a =

| | x1 | x2 | x3 |
|-----|------------|------------|------------|
| x1 | -0.0003255 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | -0.0003877 | -0.0001659 |
| x3 | 0 | 0.0001221 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | 0 | 0 | 0 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |
| x10 | 0 | 0 | 0 |

| | x4 | x5 | x6 |
|----|------------|----|----|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | 0 | 0 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | -0.0001161 | 0 | 0 |

| | | | |
|-----|---|----------|-----------|
| x5 | 0 | -0.02938 | -0.007356 |
| x6 | 0 | 0.007813 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0.007813 |
| x8 | 0 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0 | 0 |
| x10 | 0 | 0 | 0 |

| | x7 | x8 | x9 |
|-----|-----------|-------------|-------------|
| x1 | 0 | 0 | 0 |
| x2 | 0 | 0 | 0 |
| x3 | 0 | 0 | 0 |
| x4 | 0 | 0 | 0 |
| x5 | -0.000158 | -4.173e-007 | -2.813e-011 |
| x6 | 0 | 0 | 0 |
| x7 | 0 | 0 | 0 |
| x8 | 0.01563 | 0 | 0 |
| x9 | 0 | 0.03125 | 0 |
| x10 | 0 | 0 | 0.0625 |

| | x10 |
|-----|-----|
| x1 | 0 |
| x2 | 0 |
| x3 | 0 |
| x4 | 0 |
| x5 | -0 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | 0 |
| x9 | 0 |
| x10 | 0 |

b =

| | u1 |
|-----|------|
| x1 | 1 |
| x2 | 2 |
| x3 | 0 |
| x4 | 1 |
| x5 | 0.25 |
| x6 | 0 |
| x7 | 0 |
| x8 | 0 |
| x9 | 0 |
| x10 | 0 |

c =

| | x1 | x2 | x3 | x4 |
|----|----|----|-------|----|
| y1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 | 1.333 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| y6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | x5 | x6 | x7 | x8 |
|----|--------|--------|-----------|------------|
| y1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| y6 | 0.1161 | 0.0294 | 0.0006318 | 1.669e-006 |

| | x9 | x10 |
|----|-----------|-----|
| y1 | 0 | 0 |
| y2 | 0 | 0 |
| y3 | 0 | 0 |
| y4 | 0 | 0 |
| y5 | 0 | 0 |
| y6 | 1.125e-10 | 0 |

d =

| | u1 |
|----|----|
| y1 | 0 |
| y2 | 0 |
| y3 | 0 |
| y4 | 0 |
| y5 | 0 |
| y6 | 0 |

Obtenidos todos estos resultados, se decidió llevar a cabo físicamente el control PID (individualmente) de dos de los sistemas antes estudiados, estos son:

- Entrada 1 (Caudal 1) – salida 1 (Altura 1).
- Entrada 2 (Caudal 2) – salida 3 (Altura 3).

Esto se debe a que la implantación y la posibilidad de observar físicamente el control de estos sistemas (por separado) resultan más didácticos y cumplen con los objetivos de esta tesis.

CAPÍTULO 4

4 PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE: MICROLOGIX 1100 DE ALLEN BRADLEY

4.1 PROCEDIMIENTO Y ELEMENTOS DE PROGRAMACIÓN

Para el Plc Allen Bradley de la familia Micrologix 1100, tipo 1763 serie A, el software que permite realizar líneas de programación es: RSLogix 500 (de la misma casa fabricante del Plc Allen Bradley: Rockwell Automation).

Una vez que se ingrese en este programa, los pasos básicos para la creación de un programa son los siguientes:

- Crear nuevo archivo.
- Seleccionar el tipo de procesador (Plc). En nuestro caso corresponde al 1763 serie A:

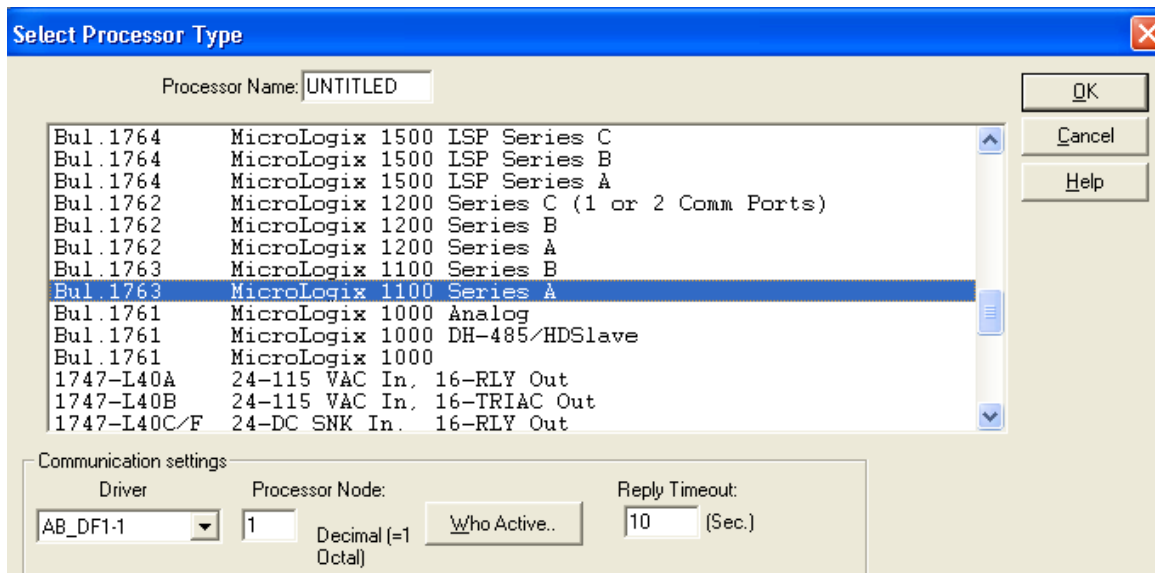


Fig. 4-1. Ventana para seleccionar el tipo de procesador o PLC.

- Una vez seleccionado el tipo de procesador, se abre un nuevo proyecto, con el cual siempre aparece una ventana llamada “árbol del proyecto”. Se denomina así porque nos pone al alcance todos los aspectos relacionados con el procesador que anteriormente seleccionamos, es decir presenta varias carpetas ordenadamente.

Entre las carpetas principales se encuentran: la primera carpeta se basa en el tipo de controlador y sus características, es así que presenta las propiedades del controlador, su estado, su configuración de entradas y salidas (allí se configuran los módulos de expansión) y los canales de comunicación.

La siguiente carpeta presenta todos los archivos y sub archivos que se hayan creado para un programa determinado, es decir nos presenta un archivo principal, pero nosotros podemos crear archivos secundarios que funcionen como subrutina.

La siguiente carpeta contiene los archivos de datos, por ejemplo las entradas (I) disponibles y empleadas, las salidas (O), las memorias en formato binary (B3), integer (N7), float (F8); los contadores (C5), los temporizadores (T4), entre otros.

Una vez abierta la ventana del tipo de archivo de dato requerido cada dirección puede ser arrastrada hasta el comando en la ventana de programación Ladder.

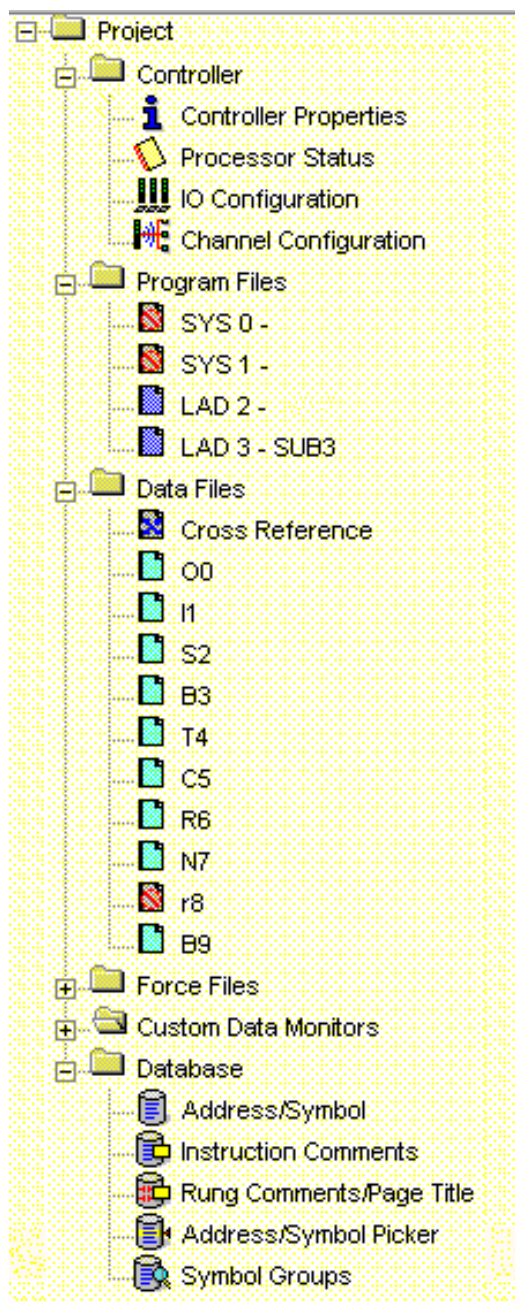


Fig. 4-2. Ventana de "árbol del proyecto".

- Una vez que nos encontremos en la ventana para la programación (Ladder view) en lenguaje Ladder, debemos ir introduciendo líneas vacías para ir colocando los comandos que sean necesarios.

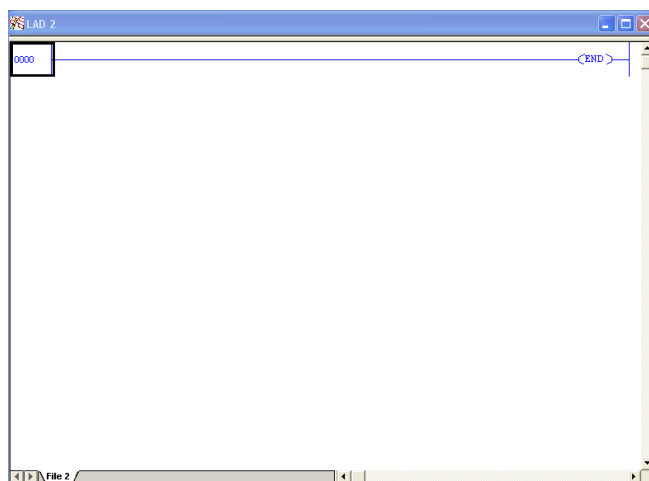


Fig. 4-3. Vista del panel para ingresar las líneas de programación en lenguaje Ladder.

Todos los comandos se pueden encontrar en la barra de comandos que se encuentra por default sobre la ventana para la programación.

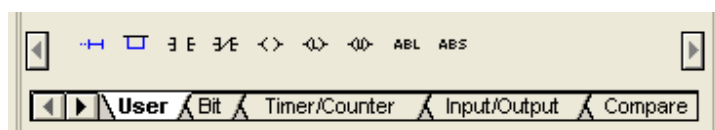


Fig. 4-4. Barra de comandos.

O también se puede activar la paleta de instrucciones que contiene todos los comandos según el tipo de procesador. (Se la puede activar rápidamente mediante las teclas: Alt+4)

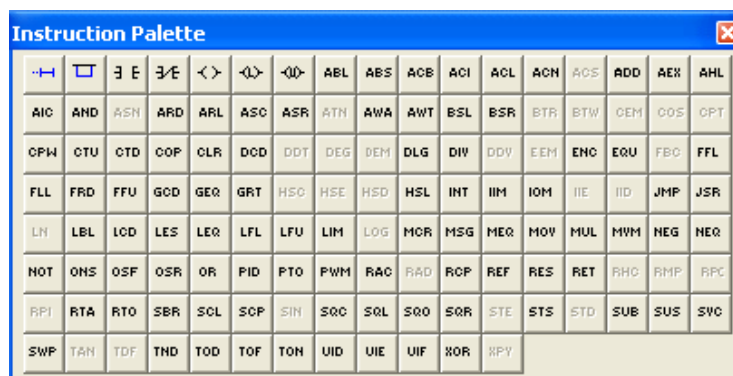



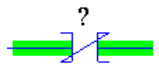
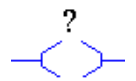
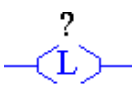
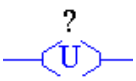
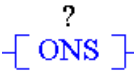
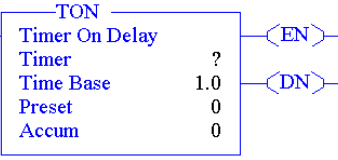
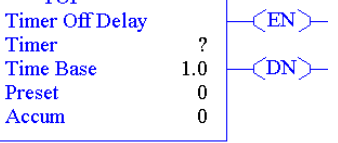
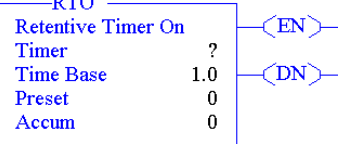
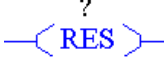
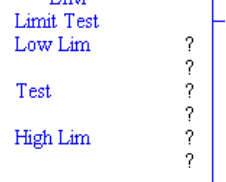


Fig. 4-5. Paleta de instrucciones.

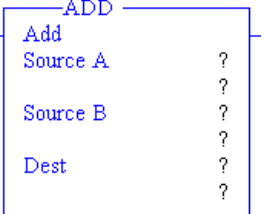
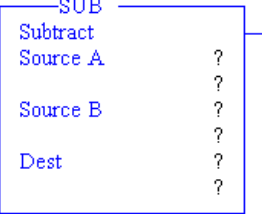
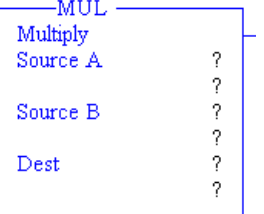
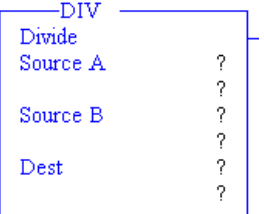
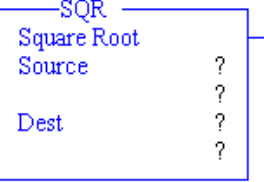
Antes de comenzar con la programación es importante reconocer varios de los comandos que con mayor frecuencia se suelen emplear, estos son:


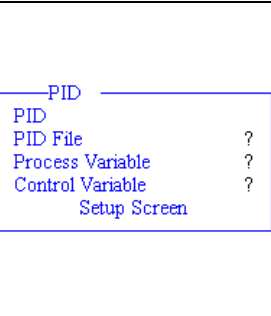
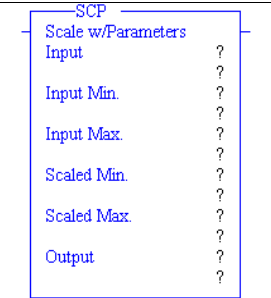
Tabla 4-1. Resumen de comandos más empleados para la programación en RSLogix 500.

| NOMBRE | SÍMBOLO | FUNCIÓN | OBSERVACIONES |
|-------------------------|---|--|--|
| New Rung |  | Añade líneas de programación vacías | Se puede obtener el mismo comando aplastando la tecla INSERT. |
| Rung Branch |  | Añada una línea de programación paralela a otra. | |
| Examine if Closed (XIC) |  | Si el valor de la dirección asignada es 1, permite la energización de los comandos siguientes. | En la parte superior se coloca la dirección (puede ser una entrada, salida, una memoria en formato de número binario o entero). |
| Examine if Open (XIO) |  | Permite el paso de la energía a los siguientes comandos hasta que la dirección asignada cambie su estado de 0 a 1. | En la parte superior se coloca la dirección (puede ser una entrada, salida, una memoria en formato de número binario o entero). |
| Output Energize (OTE) |  | Mientras la línea se encuentre energizada (los comandos anteriores se cumplan), pone a 1 la dirección asignada. | En la parte superior se coloca la dirección (debe ser una salida) |
| Output Latch (OTL) |  | Cambia de 0 a 1 el estado de la dirección asignada. | En la parte superior se coloca la dirección (debe ser una salida). Solo requiere ser energizada 1 vez para que quede enclavada la dirección. |
| Output Unlatch (OTU) |  | Cambia de 1 a 0 el estado de la dirección asignada. | En la parte superior se coloca la dirección (debe ser una salida). Solo requiere ser energizada 1 vez para que desenclave la dirección. |

| | | | |
|--------------------------------|---|---|--|
| One Shot (ONS) |  | Permite el paso de la corriente si verificó que en la dirección del comando anterior se dio un cambio de 0 a 1. | En la parte superior se coloca la dirección de una memoria que va verificando el paso de la corriente. |
| Timer on-delay (TON) |  | Activa un temporizador, el cual después de transcurrido el tiempo seteado, activa o desactiva una salida. | En Timer se coloca la dirección del temporizador. En Time Base se coloca la base de tiempo en la que queremos que cuente. En Preset se coloca el valor del tiempo que debe contar. |
| Timer off-delay (TOF) |  | Activa un temporizador, el cual después de transcurrido el tiempo seteado, activa o desactiva una salida. | Este temporizador se activa cuando el comando anterior (de activación) a cambiado del estado 1 a 0. |
| Retentive Timer on-delay (RTO) |  | Activa un temporizador, el cual después de transcurrido el tiempo seteado, activa o desactiva una salida. | Tiene una memoria que le permite comenzar en el mismo valor si por alguna razón fuese desactivado y vuelto a activar. |
| Reset (RES) |  | Resetea temporizadores y contadores | En la parte superior se coloca la dirección del temporizador o contador que se quiere resetear. |
| Limit Test (LIM) |  | Evalúa los valores de su dirección dentro de un rango (un valor máximo y un valor mínimo). | Si la dirección evaluada tiene un valor dentro de estos límites, la salida se energiza; por el contrario, si está fuera de los límites, la salida se desenergiza. |

| | | | |
|--------------------------------|--|--|---|
| Equal (EQU) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">EQU</p> <p>Equal</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta el mismo valor que la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |
| Not Equal (NEQ) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">NEQ</p> <p>Not Equal</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta un valor distinto al de la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |
| Less Than (LES) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">LES</p> <p>Less Than (A<B)</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta un valor menor que el de la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |
| Greater Than (GRT) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">GRT</p> <p>Greater Than (A>B)</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta un valor mayor que el de la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |
| Less Than or Equal (LEQ) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">LEQ</p> <p>Less Than or Eq (A<=B)</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta un valor menor o igual que el de la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |
| Greater Than or Equal (GEQ) | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">GEQ</p> <p>Grtr Than or Eq (A>=B)</p> <p>Source A ?</p> <p> ?</p> <p>Source B ?</p> <p> ?</p> </div> | Evalúa si la dirección A presenta un valor mayor o igual que el de la dirección B. | Si se cumple esta condición, se energiza la salida. |

| | | | |
|---------------------------------|---|---|---|
| <p>Addition (ADD)</p> |  | <p>Suma el valor de la dirección A con el valor de la dirección B, y el resultado lo presenta en otra dirección (Dest).</p> | <p>A y B pueden ser direcciones o valores constantes.</p> |
| <p>Substraction (SUB)</p> |  | <p>Resta el valor de la dirección B al valor de la dirección A, y el resultado lo presenta en otra dirección (Dest).</p> | <p>A y B pueden ser direcciones o valores constantes</p> |
| <p>Multiplication (MUL)</p> |  | <p>Multiplica el valor de la dirección A con el valor de la dirección B, y el resultado lo presenta en otra dirección (Dest).</p> | <p>A y B pueden ser direcciones o valores constantes</p> |
| <p>Division (DIV)</p> |  | <p>Divide el valor de la dirección A para el valor de la dirección B, y el resultado lo presenta en otra dirección (Dest).</p> | <p>A y B pueden ser direcciones o valores constantes</p> |
| <p>Square root (SQR)</p> |  | <p>Saca la raíz cuadrada de una dirección determinada y el resultado lo presenta en otra dirección (Dest).</p> | |

| | | | |
|---|---|---|--|
| <p>Move (MOV)</p> |  <pre> MOV Move Source ? ? Dest ? ? </pre> | <p>Copia el valor de la dirección de entrada (determinada) en otra dirección (Dest).</p> | <p>Este comando ayuda en la transformación de los formatos de las direcciones, por ejemplo, se puede transformar un valor en formato entero a formato flotante.</p> |
| <p>Proportional Integral Derivative (PID)</p> |  <pre> PID PID File ? Process Variable ? Control Variable ? Setup Screen </pre> | <p>Es el bloque de control PID. Presenta una pantalla en la cual podemos introducir todos los parámetros de control (Kp, Ti, Td), los límites, el valor de referencia, entre otros.</p> | <p>En PID File se coloca la dirección del archivo PID que queremos crear. En Variable de Proceso se coloca la dirección de la entrada que queremos controlar. Mientras que la Variable de Control se refiere a la dirección de la salida una vez que se ha realizado el control.</p> |
| <p>Scale with Parameters (SCP)</p> |  <pre> SCP Scale w/Parameters ? Input ? Input Min. ? Input Max. ? Scaled Min. ? Scaled Max. ? Output ? </pre> | <p>Permite realizar una linealización al introducir límites de los valores de entrada y de los valores con los cuales queremos crear una relación.</p> | |

Una vez conocidos estos comandos, ya se puede comenzar con la programación.

- En líneas de programación vacías se van introduciendo los comandos y según sea la necesidad pueden ir en serie o en paralelo.

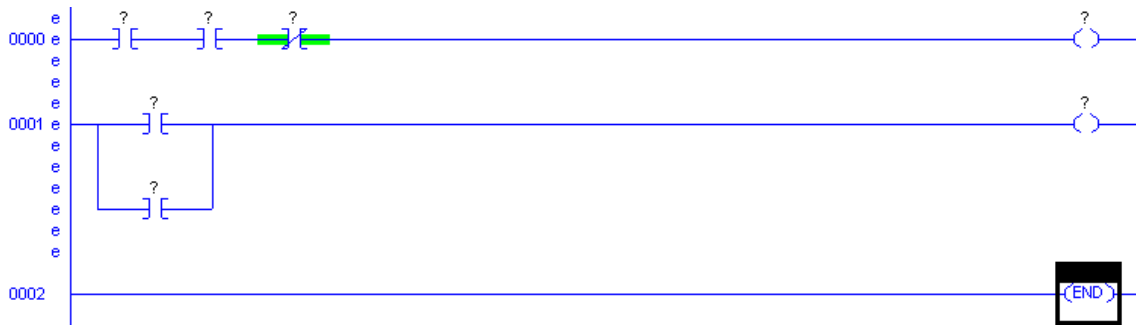
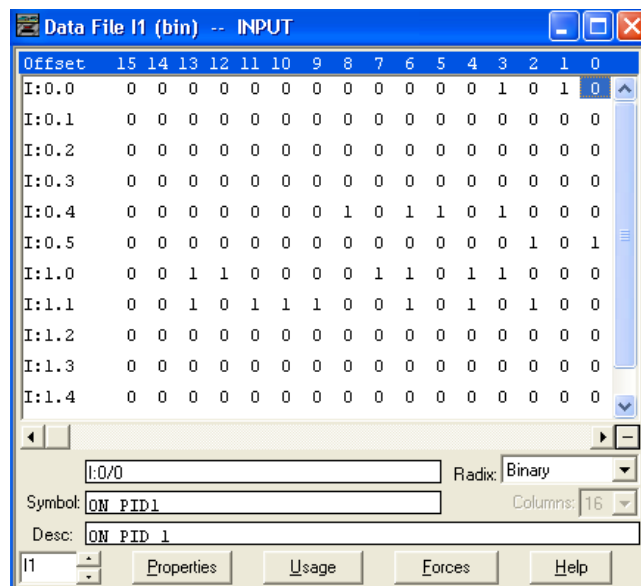


Fig. 4-6. La línea 0 indica un circuito en serie. La línea 1 indica un circuito en paralelo.

- Una vez introducido el comando, se le debe asignar una dirección. Esto se lo puede hacer de dos maneras: la primera consiste por ejemplo en abrir del “árbol de proyectos” la carpeta de entradas, de la cual se selecciona una sola y se la arrastra hasta el signo de interrogación del comando en la pantalla de programación.



La segunda es una manera manual, en cuyo caso se debe conocer que tipo de entrada es (designación y formato).

Es importante aclarar que RSLogix (RockWell Automation) y Allen Bradley trabajan con los formatos Bit y Word. Las direcciones se asignan de la siguiente manera:

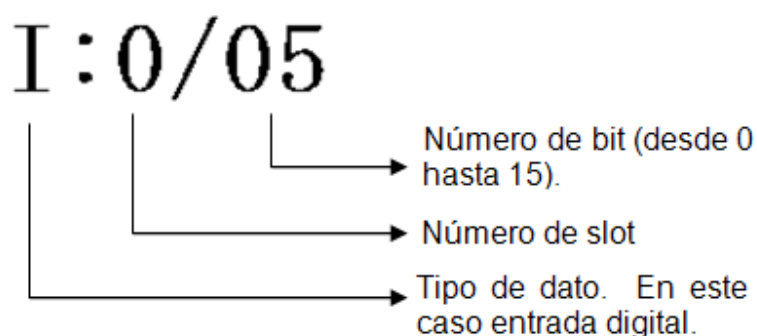


Fig. 4-7. Forma de direccionar los elementos o datos.

4.2 PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

4.2.1 DESIGNACIÓN DE ELEMENTOS EMPLEADOS EN LA PROGRAMACIÓN

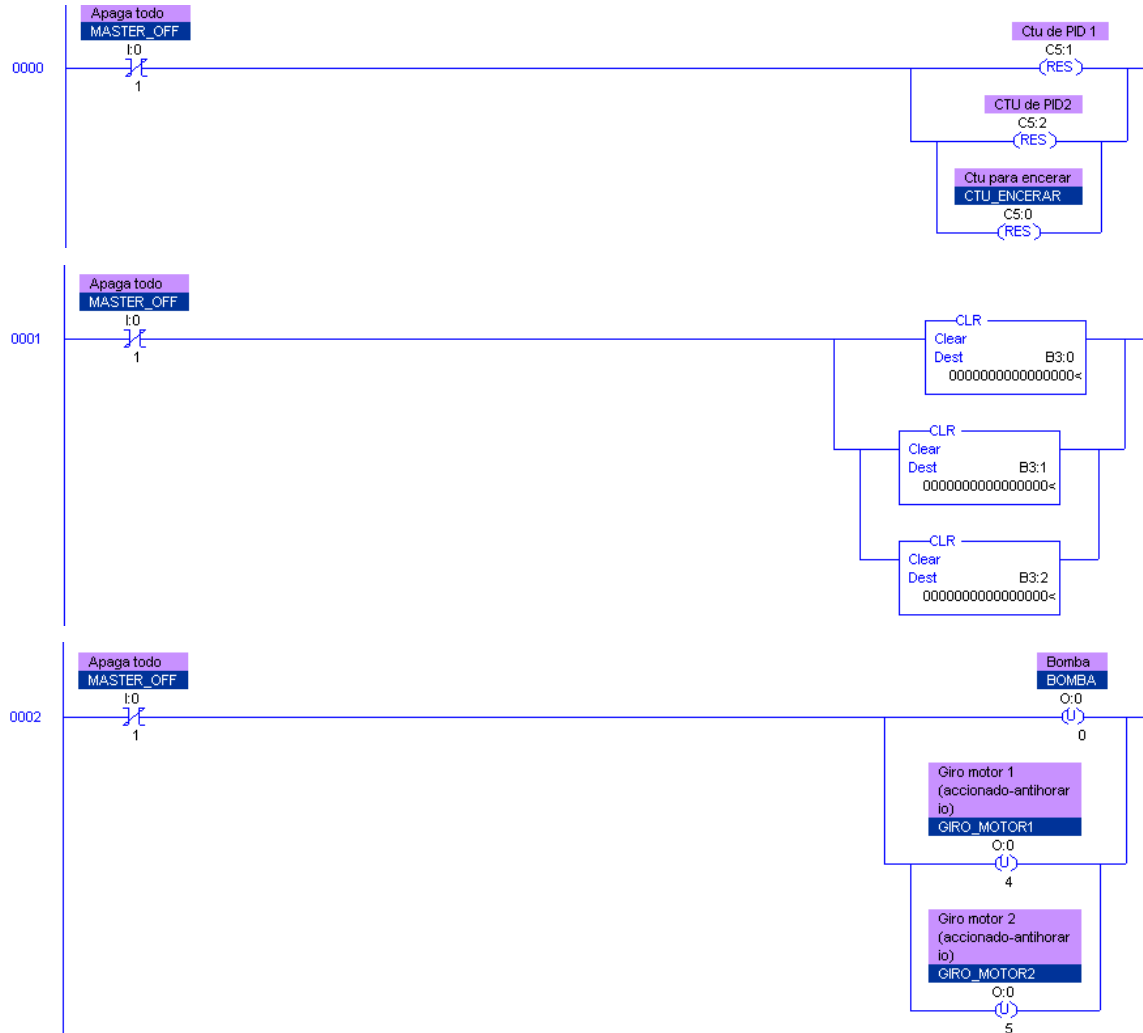
Previo al análisis del programa es importante dar a conocer la designación de los distintos elementos empleados. La siguiente tabla presenta la designación de nombres a entradas, salidas, memorias, temporizadores, contadores y archivos de PID que se emplearon en la programación de este módulo.

Tabla 4-2. Tabla de resumen de etiquetas de los elementos de la programación del módulo didáctico.

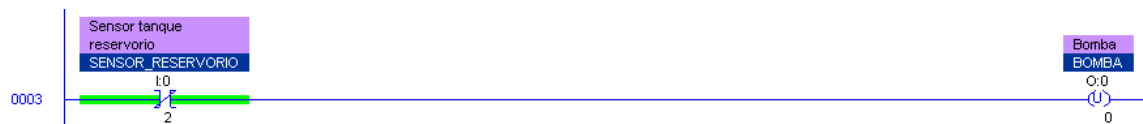
| Dirección | Nombre | Descripción |
|-----------|----------------|--|
| B3:0/0 | | Memoria para iniciar el ciclo 1 |
| B3:0/1 | MEM_1_ENCERADO | Memoria 1 para activar ton4:0 - encerado |

| | | |
|---------|-------------------|---|
| B3:0/2 | MEM_2_ENCERADO | Memoria 2 para activar ton4:0 - encerado |
| B3:0/4 | | Memoria para energizar PID1 |
| B3:0/5 | | Memoria inicia secuencia motor 1 |
| B3:0/6 | | Memoria1 secuencia pulsos motor 1 |
| B3:0/7 | | Memoria2 secuencia pulsos motor 1 |
| B3:0/8 | | Memoria para iniciar ciclo 2 |
| B3:0/9 | | Memoria energizar PID2 |
| B3:0/10 | | Memoria inicia secuencia motor 2 |
| B3:0/11 | | Memoria 1 secuencia pulsos motor2 |
| B3:0/12 | | Memoria 2 secuencia pulsos motor2 |
| B3:2/0 | | Mem para activar sub: encerado |
| C5:0 | CTU_ENCERAR | Ctu para encerar |
| C5:1 | | Ctu de PID 1 |
| C5:2 | | Ctu de PID2 |
| F8:5 | | Cambio del formato de la entrada a Flotante |
| I:0/0 | ON_PID1 | ON PID 1 |
| I:0/1 | MASTER_OFF | Apaga todo |
| I:0/2 | SENSOR_RESERVORIO | Sensor tanque reservorio |
| I:0/3 | ON_PID2 | ON PID 2 |
| I:0/4 | | Nivel tanque 1 |
| N7:1 | ESCAL_PID_T1 | Escalonado PID tanque 1 |
| N7:2 | | Posición presente motor 1 |
| N7:3 | | Delta posición |
| N7:4 | | ABS Delta Posición |
| N7:5 | | Escalonado para PID2 |
| N7:7 | | Escalonado a la salida de PID tanque3 |
| N7:8 | | Delta posición2 |
| N7:9 | | ABS delta posición2 |
| N7:11 | | Posición presente motor 2 |
| O:0/0 | BOMBA | Bomba |
| O:0/2 | PULSO_MOTOR1 | Pulso motor 1 |
| O:0/3 | PULSO_MOTOR2 | Pulso motor 2 |
| O:0/4 | GIRO_MOTOR1 | Giro motor 1 (accionado-antihorario) |
| O:0/5 | GIRO_MOTOR2 | Giro motor 2 (accionado-antihorario) |
| PD9:10 | | PID 1 |
| PD9:40 | | PID 2 |
| T4:0 | TON_ENCERAR | Ton para encerar |
| T4:2 | | TON de PID1 |
| T4:3 | | TON de PID2 |
| U:3 | | Subrutina de encerado |
| U:4 | | Subrutina de encerado 2 |

4.2.2 ANÁLISIS DEL PROGRAMA

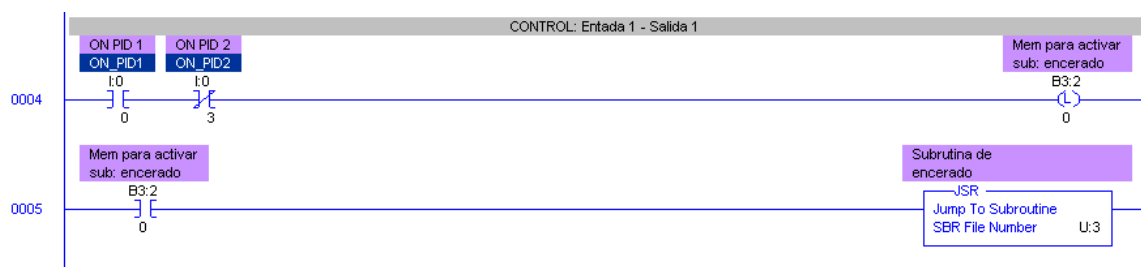


La línea 0, 1 y 2 del programa indican las acciones que deben suceder si el botón de apagado (Master off) es pulsado. Esto es se resetean todos los contadores empleados, las memorias B3:0 (desde el bit 0 hasta el 15), B3:1, B3:2, se desenchava la bomba y el sentido de giro de los motores paso a paso.



La línea 3 indica que si el sensor del tanque reservorio detecta que el nivel de agua en este tanque es el mínimo, entonces se apaga la bomba. Esta línea es necesaria para proteger el funcionamiento y vida útil de la bomba.

PID 1

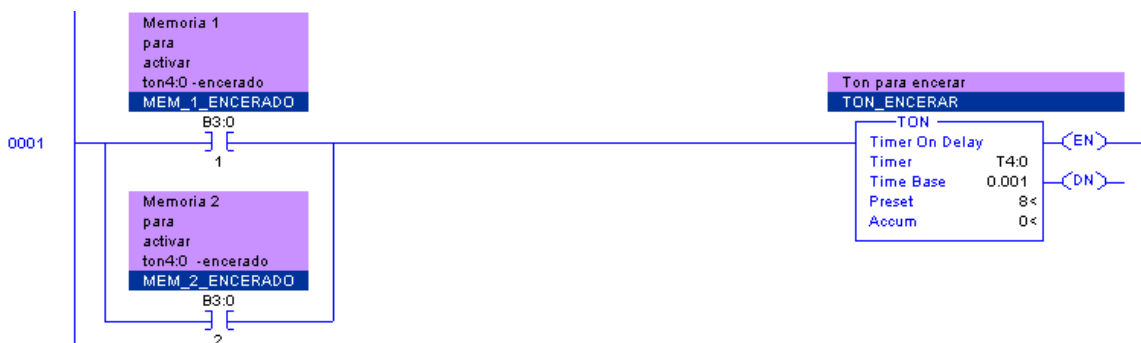
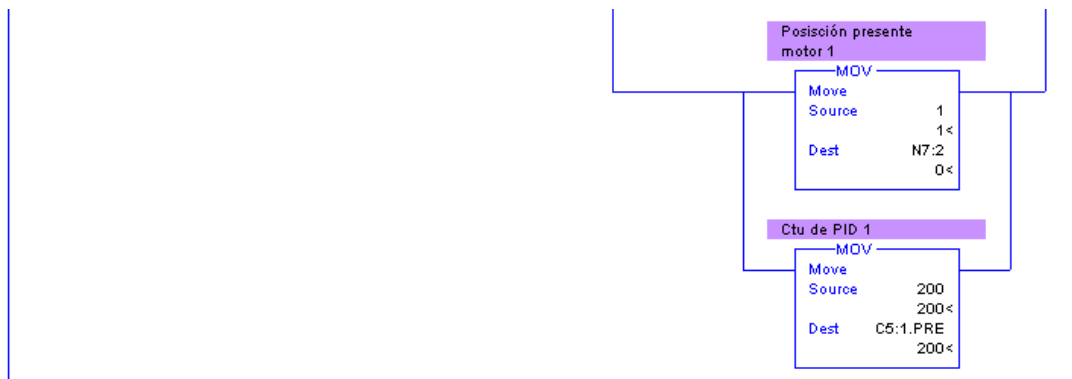
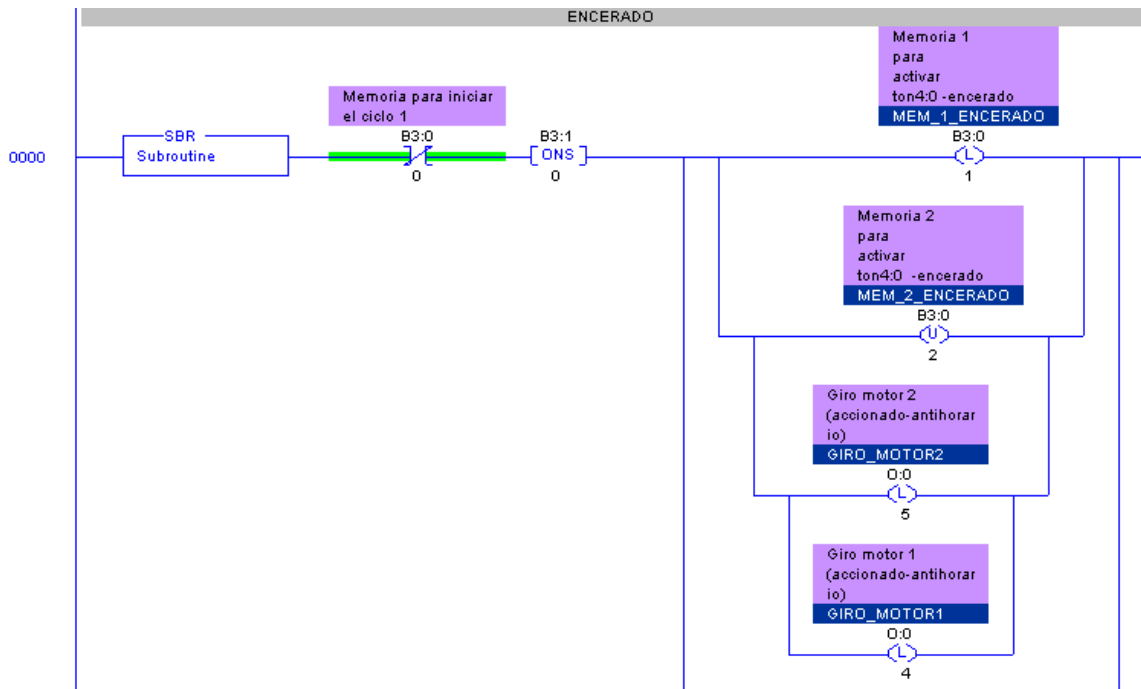


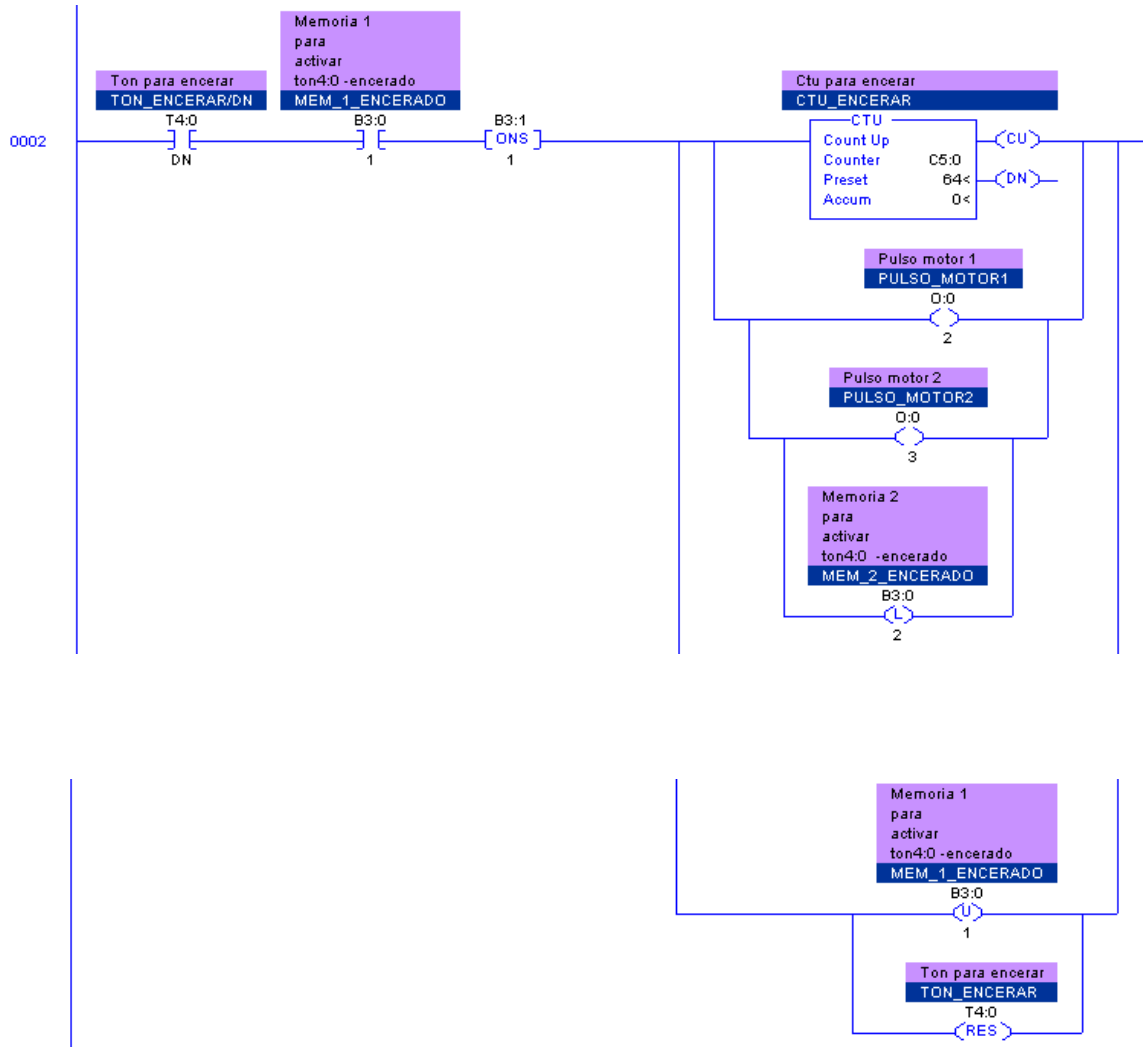
La primera parte de la programación realiza el control PID del sistema: Entrada 1 – Salida 1; es decir del tanque 1 mediante la válvula del motor 1.

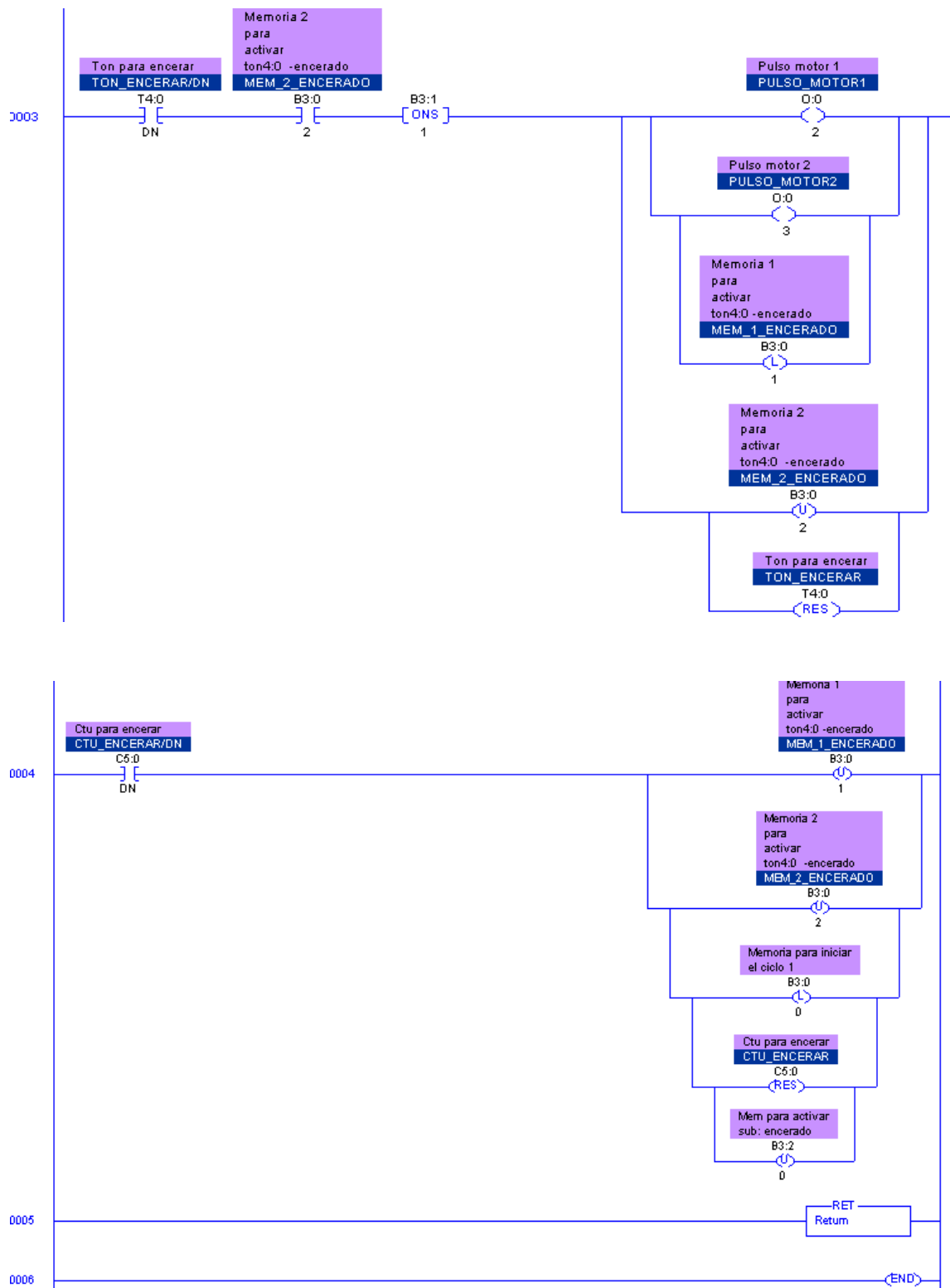
Las líneas 4 y 5 indican que si pulsamos el botón I:0/0 (On para el PID 1), se enclavará una memoria que dará paso a la subrutina de encerado.

SUBROUTINA DE ENCERADO 1

Antes de comenzar con la acción de encerado, es necesario cerciorarse que las dos válvulas se encuentran casi totalmente cerradas y a partir de ese punto, de acuerdo a la siguiente programación, las válvulas se abrirán $\frac{1}{4}$ de vuelta.





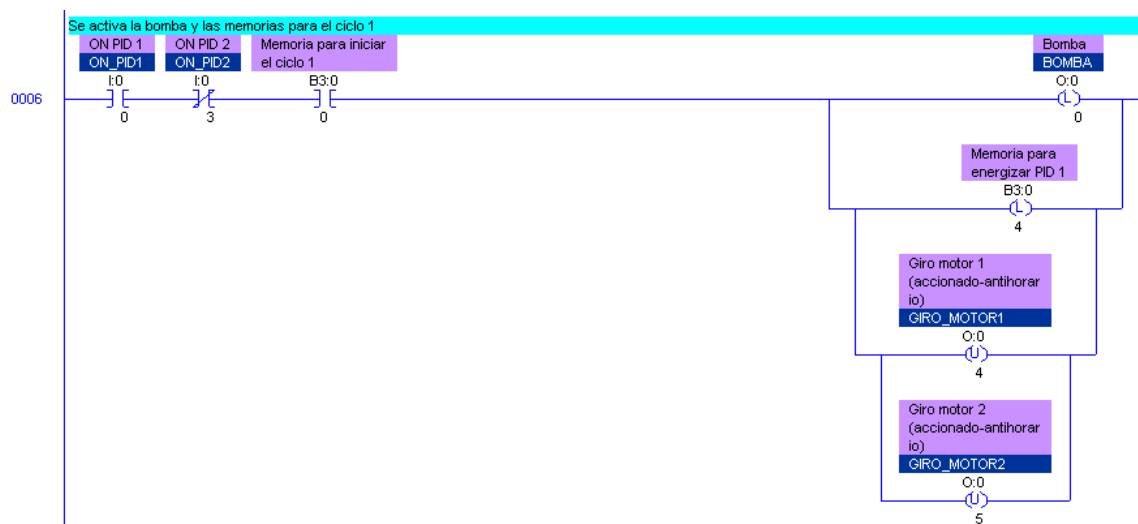


Mediante un juego entre las memorias B3:0/1 y B3:0/2 se irá activando un temporizador durante 8 [ms] (tiempo mínimo para que los motores paso a paso

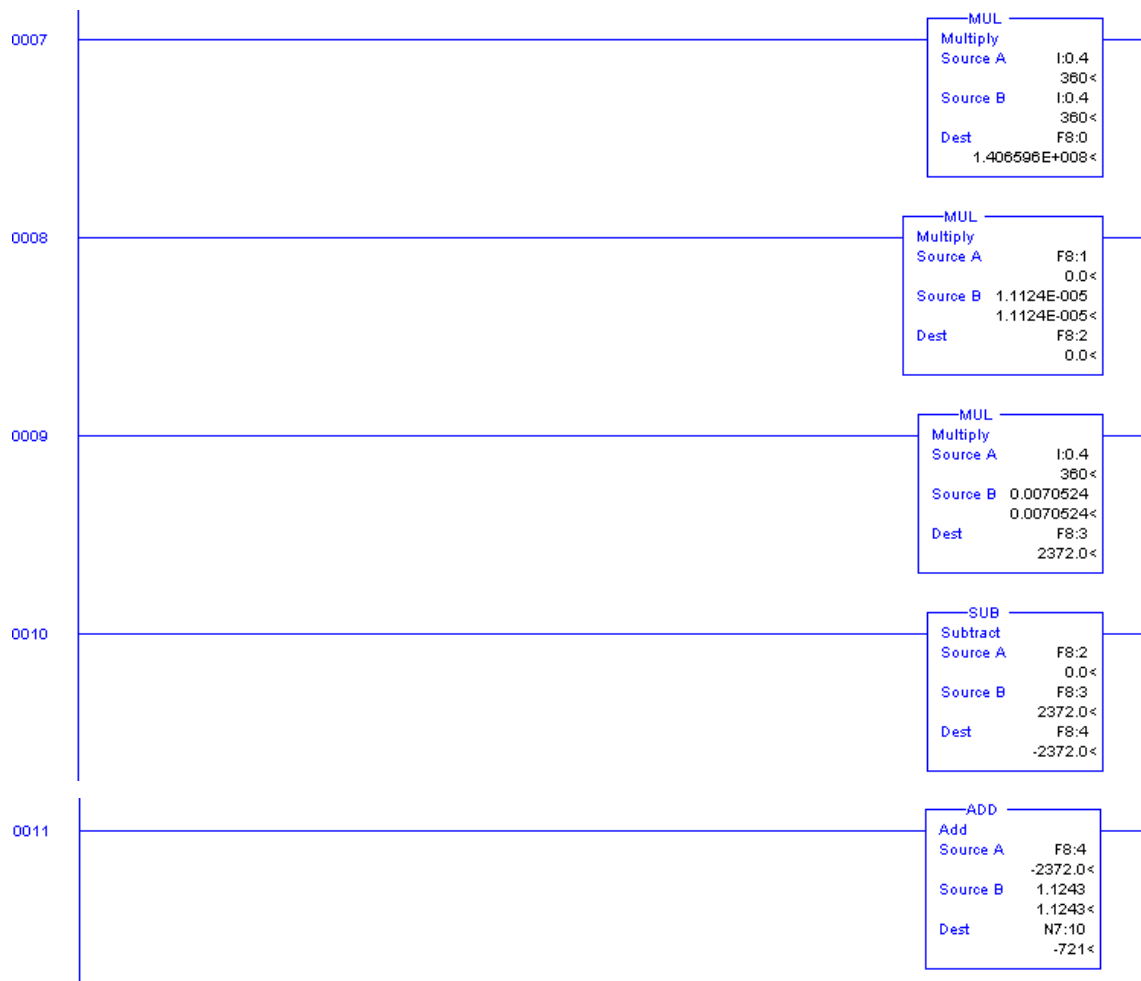
reconozcan la entrada de una señal), el cual al final de su conteo dará la orden de generar un pulso para los motores paso a paso y para un contador C5:0 el cual deberá contar 64 pulsos que corresponderán finalmente a $\frac{1}{4}$ de vuelta de las válvulas.

Una vez que el acumulador del contador llega a igualar el valor determinado (preset), el contador da la orden de desactivar los sentidos de giro de los motores, resetear el contador, enclava la memoria B3:0/0 para iniciar el ciclo 1 y regresar a la línea principal del programa.

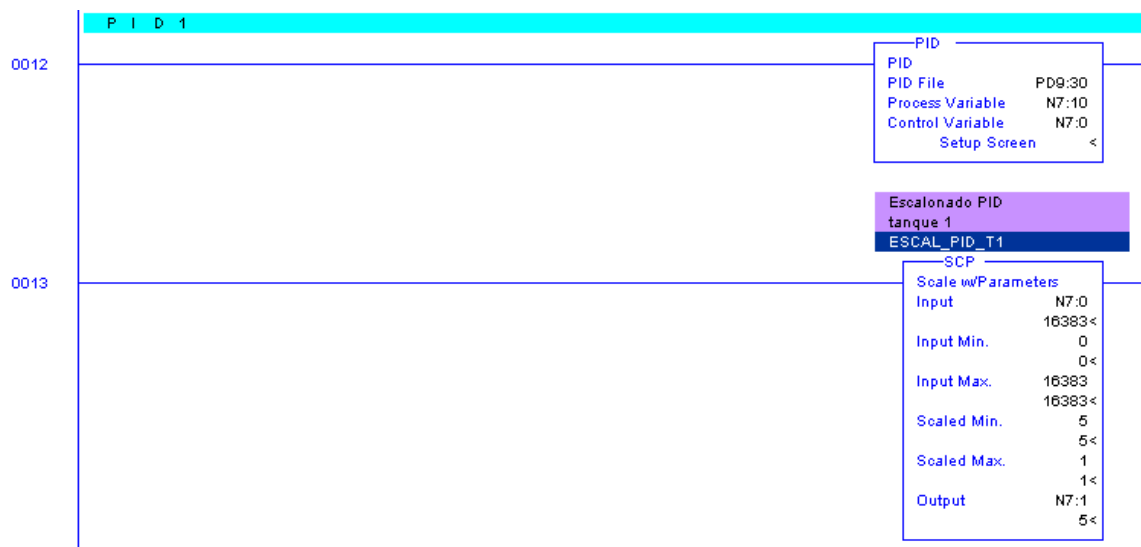
Una vez que se ha regresado a la programación principal, se activará la bomba y ciertas memorias para el inicio del ciclo 1.



Al presionar nuevamente el botón I:0/0, y una vez enclavada la memoria B3:0/0 se activa la bomba, se energiza una memoria que dará paso al PID y se desenclavan los sentidos de giro de los dos motores (por si en algún momento de la programación hubiesen quedado enclavadas).



Desde la línea 7 hasta la línea 11 se realiza un escalamiento “manual” de la señal (proveniente de la entrada analógica I:0/4 correspondiente al flotador del tanque 1) ya que la curva obtenida de altura vs Word de entrada, presenta una tendencia polinomial de segundo grado. Existe una manera fácil de realizar un escalamiento en el programa RSLogix 500 mediante su comando SCP, pero este únicamente realiza un escalamiento lineal.

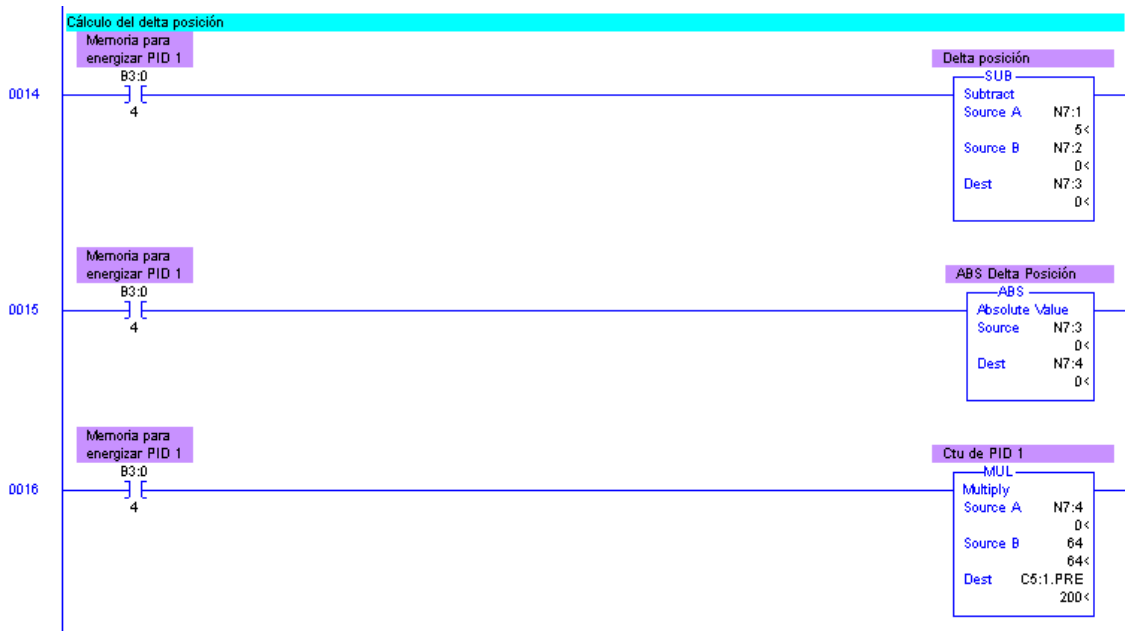


La línea 12 presenta el comando PID. Su variable de proceso es la memoria N7:10 obtenida en el anterior escalamiento. La variable de salida que ya ha sido controlada es N7:0. Esta última es nuevamente escalonada para obtener valores entre 1 y 5 (discretización de datos obtenidos). Donde cada unidad corresponde a $\frac{1}{4}$ de vuelta. En el siguiente gráfico se muestran los parámetros del PID 1.

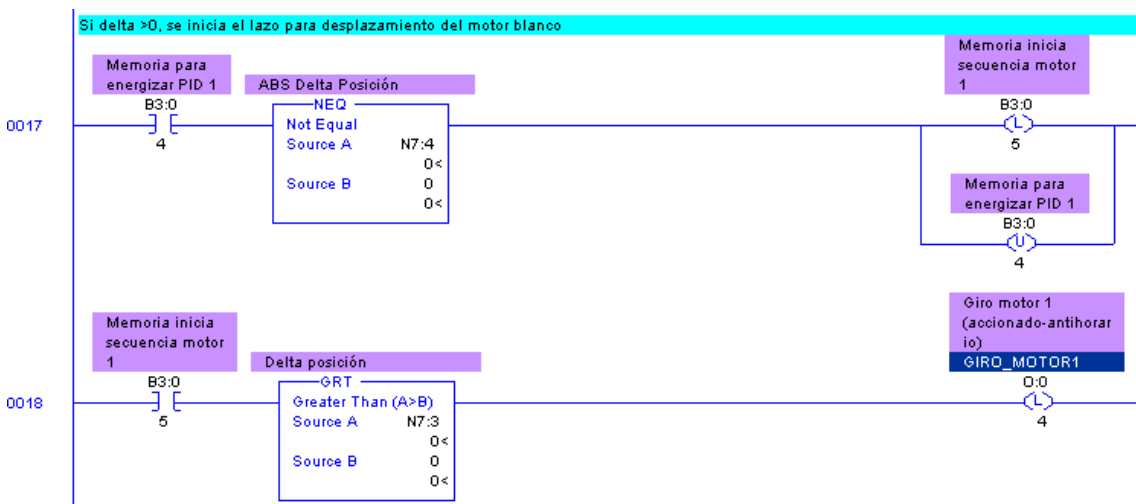
The screenshot shows the PID Setup dialog box with the following parameters:

| Tuning Parameters | | Inputs | | Output | | Flags | |
|----------------------|---------|------------------------|-----|-------------------------|-----|-------|---|
| Controller Gain Kc = | 1.7 | Scaled Set Point SPS = | 50 | Control Output CV (%) = | 100 | TM = | 0 |
| Reset Ti = | 170.0 | Setpoint MAX(Smax) = | 145 | Output Max CV (%) = | 0 | AM = | 0 |
| Rate Td = | 14.71 | Setpoint MIN(Smin) = | 0 | Output Min CV (%) = | 0 | CM = | 0 |
| Loop Update = | 0.05 | Process Variable PV = | 0 | Scaled Error SE = | 0 | DL = | 0 |
| Control Mode = | E=SP-PV | | | Error Code = | 0 | RG = | 0 |
| PID Control = | AUTO | | | | | SC = | 0 |
| Time Mode = | STI | | | | | TF = | 0 |
| Limit Output CV = | NO | | | | | DA = | 0 |
| Deadband = | 0 | | | | | DB = | 0 |
| Feed Forward Bias = | 0 | | | | | UL = | 1 |
| | | | | | | LL = | 0 |
| | | | | | | SP = | 0 |
| | | | | | | PV = | 1 |
| | | | | | | DN = | 1 |
| | | | | | | EN = | 1 |

Buttons: OK, Cancel, Help



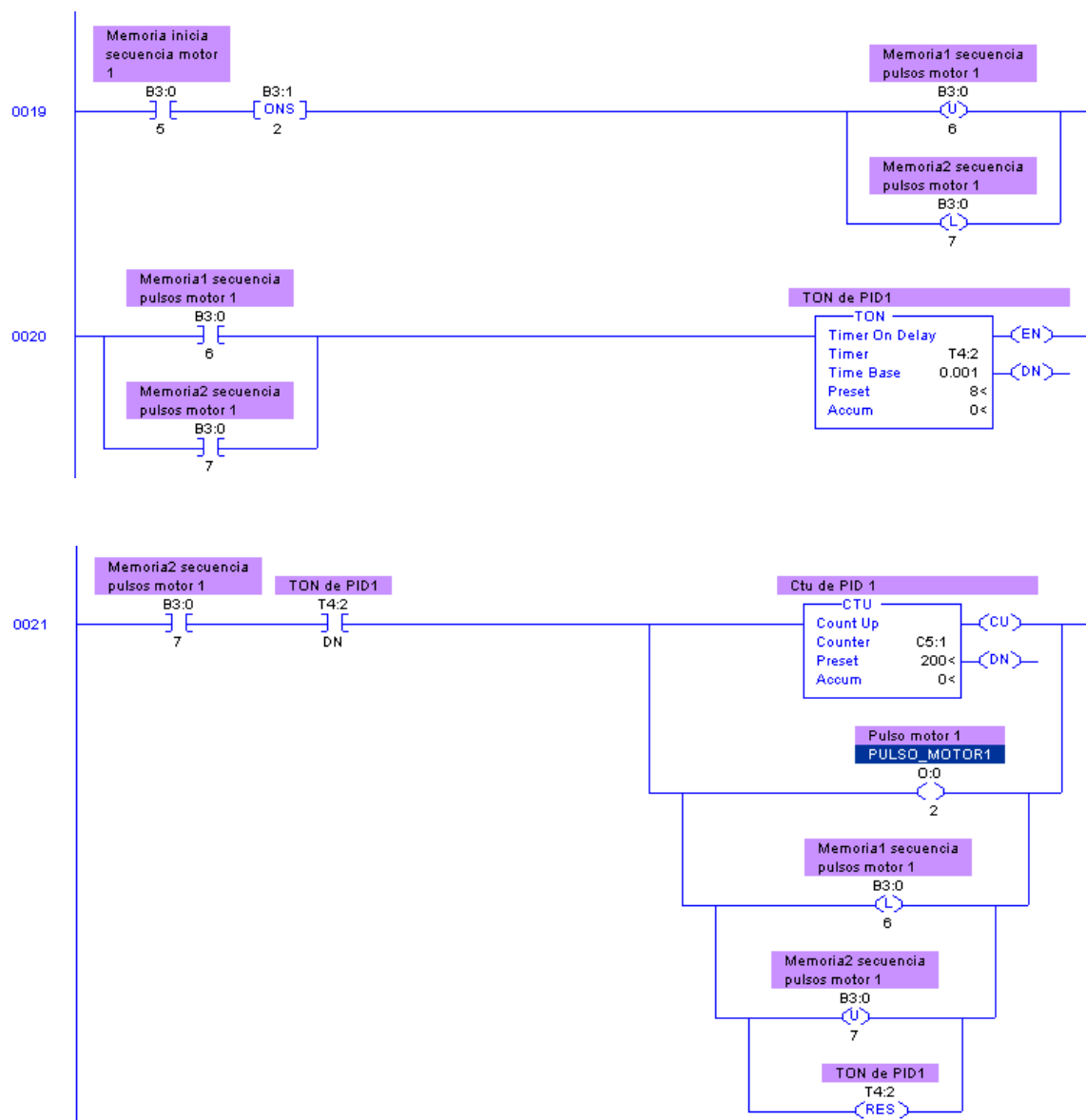
Con este valor discretizado, se procede a calcular la variación de la posición (delta posición) de la válvula. Para lo cual se compara con la posición anterior (1/4 de vuelta debido al encendido inicial) y se extrae su valor absoluto. Este valor es multiplicado por 64 para designarlo como el parámetro Preset del contador C5:1. Es decir este contador deberá contar 64 veces el valor absoluto del delta posición.

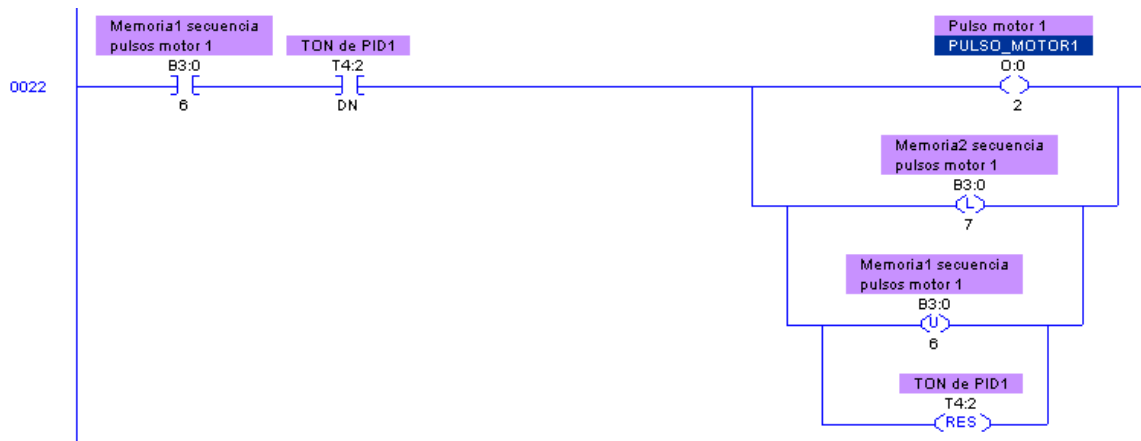


Si el delta obtenido no es igual a 0, se desenchava la memoria que permitía energizar al PID, y enchava otra memoria que ayuda en el inicio de la secuencia de

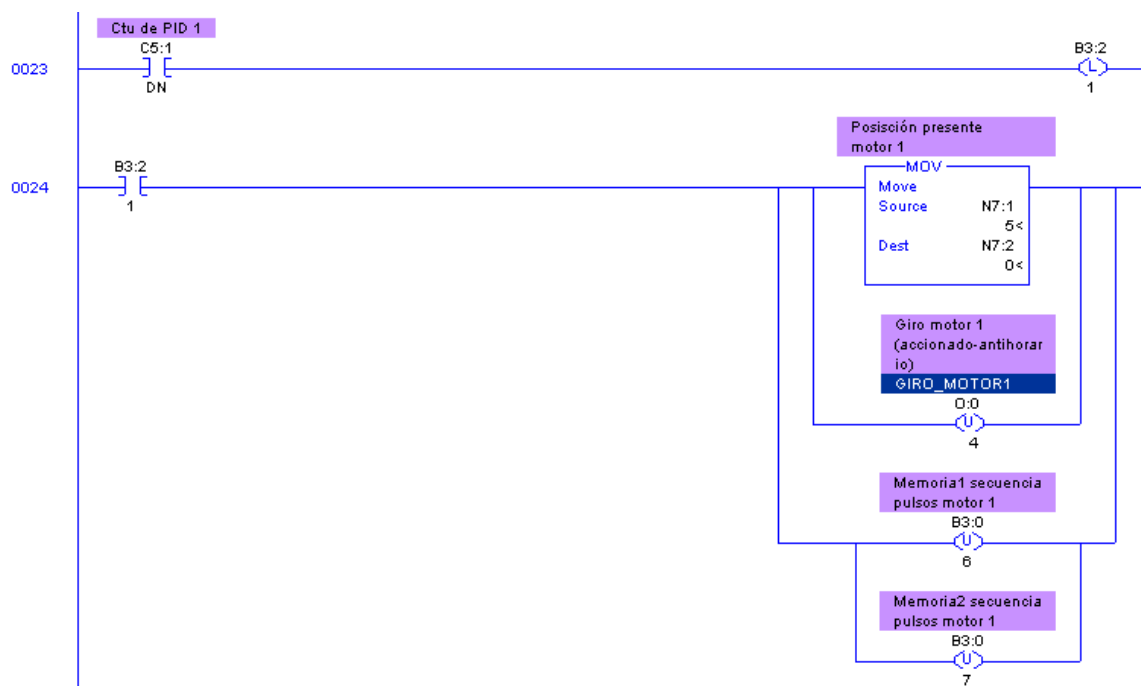
pulsos para el motor 1. (Al activar y desactivar las memorias anteriores se logra evitar que ciertas acciones se produzcan incorrectamente al mismo tiempo).

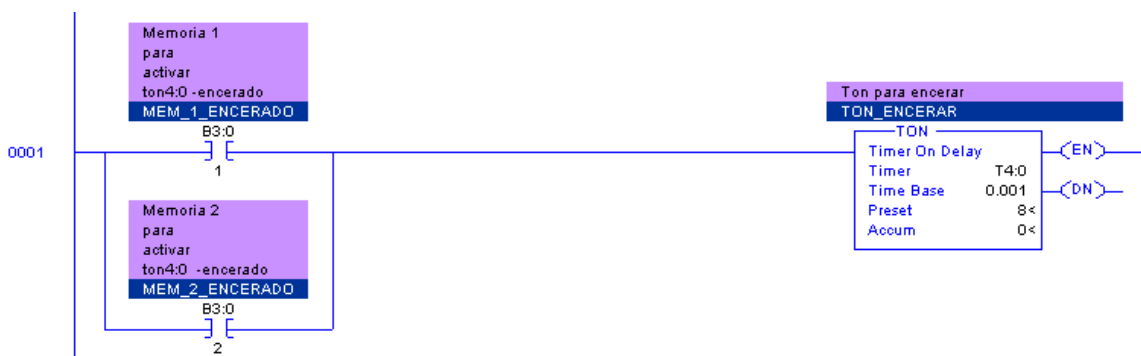
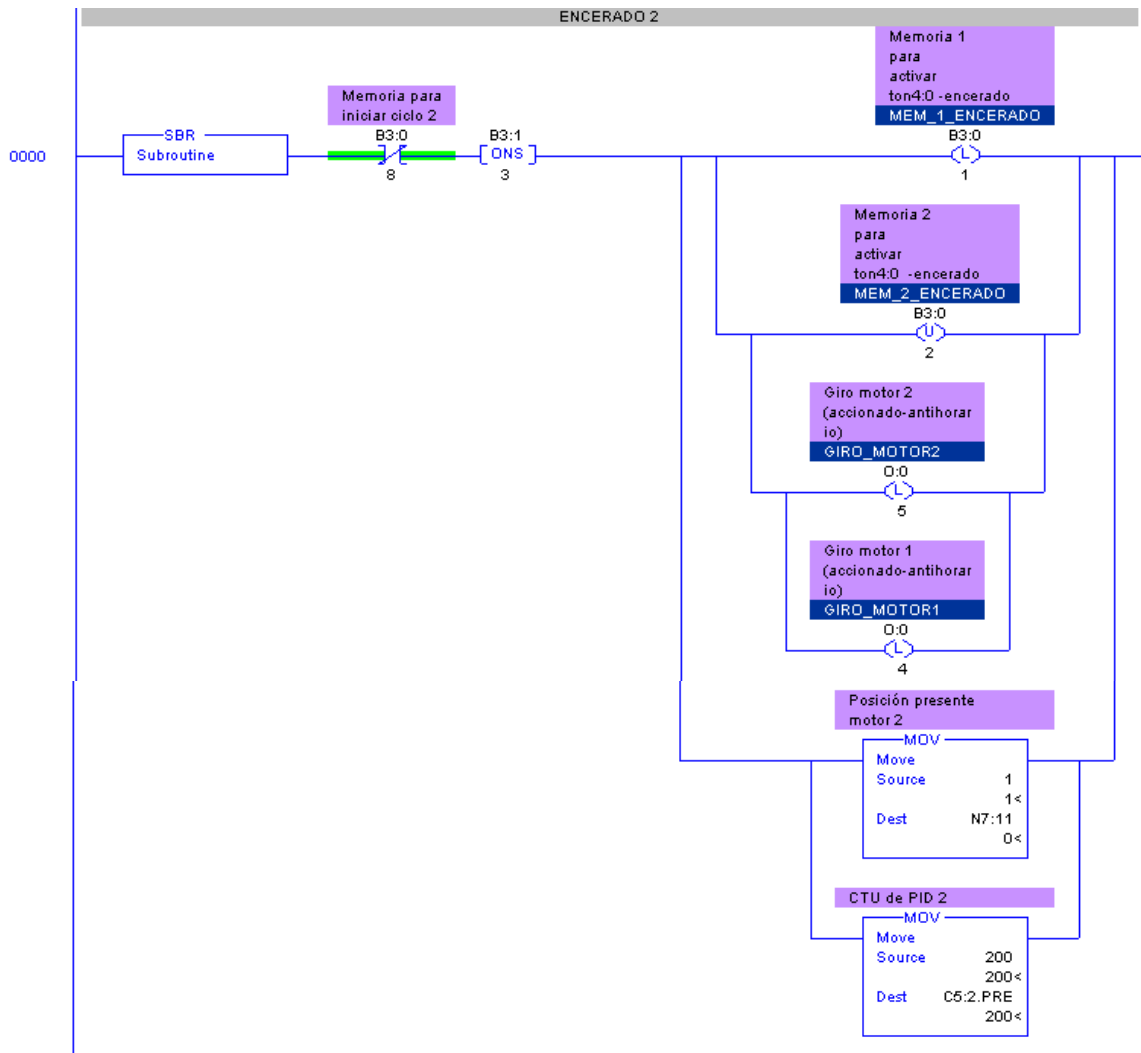
Por otra parte, si el delta obtenido (sin valor absoluto) es mayor que 0, se enclava el sentido de giro anti horario del motor 1.

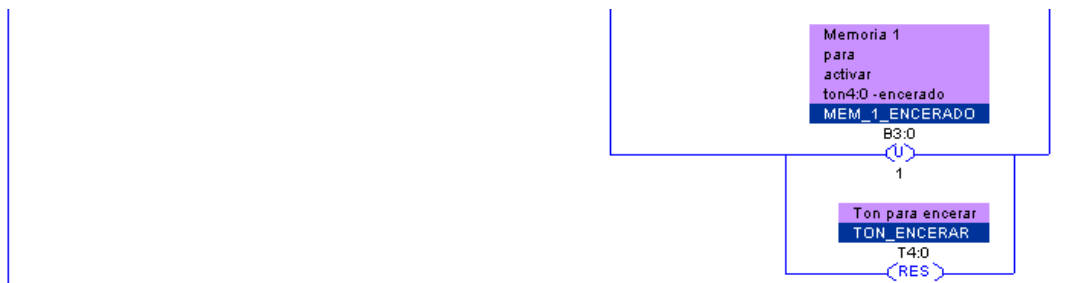
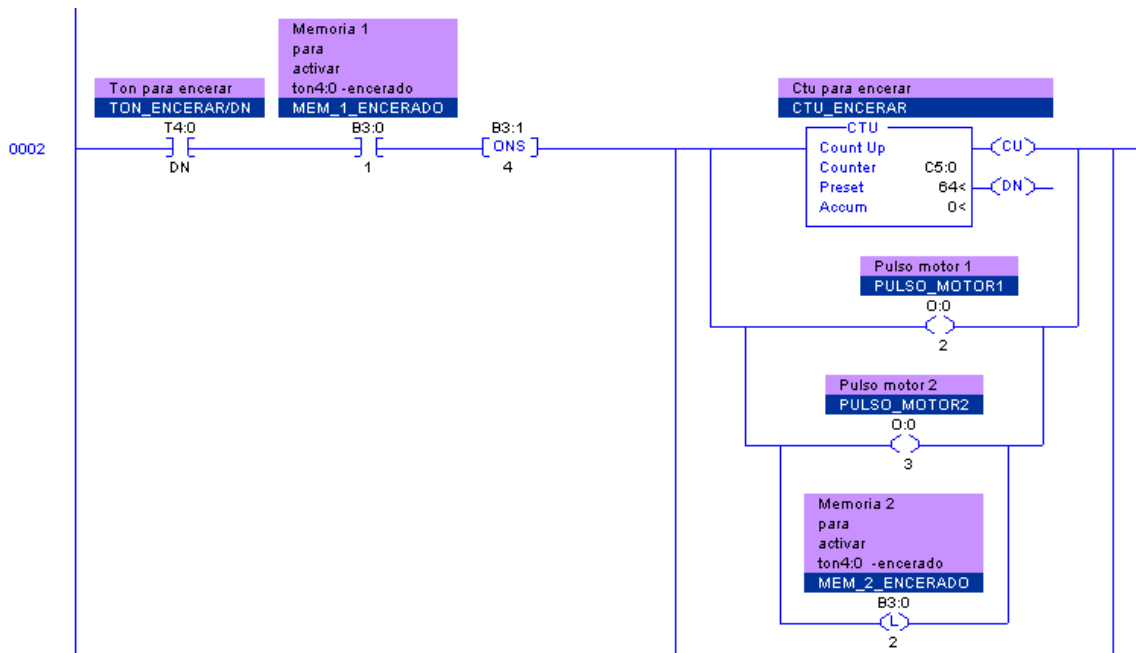


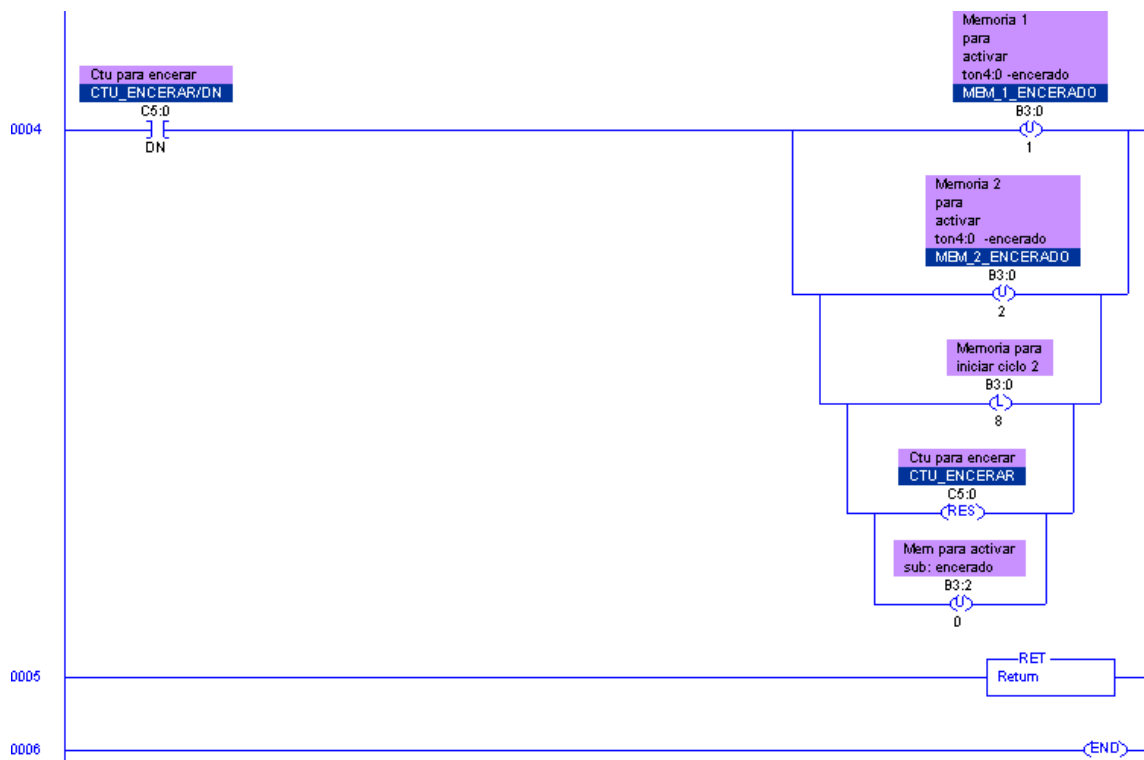
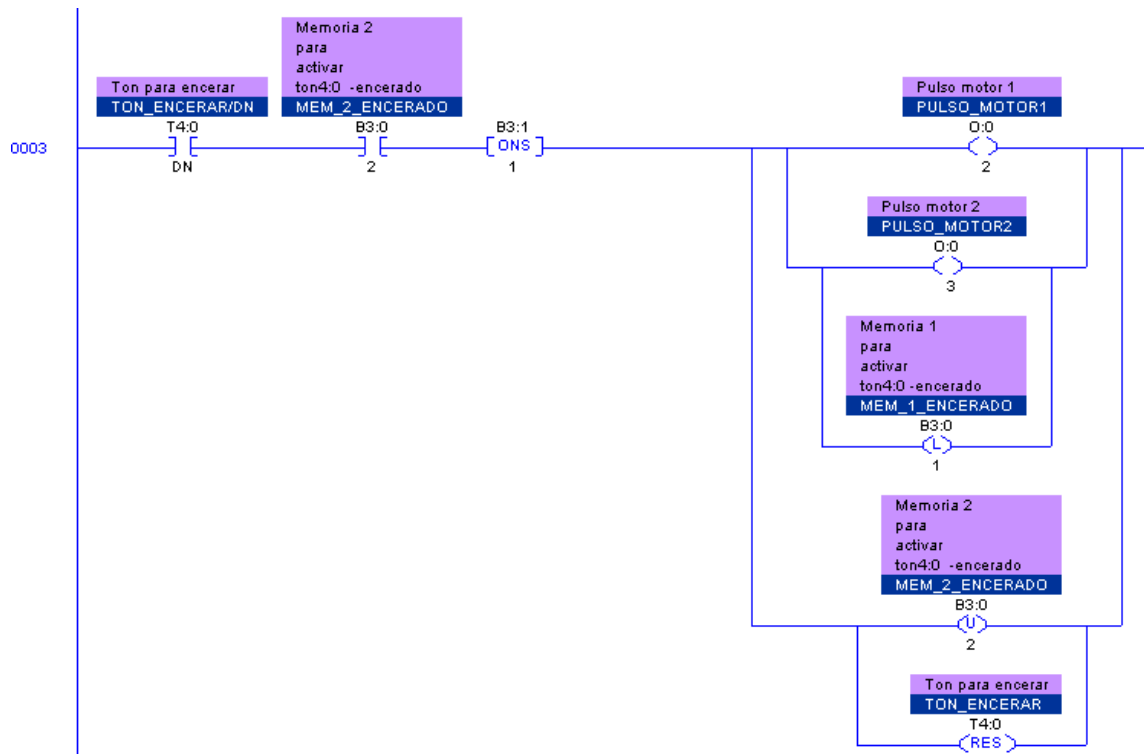


Desde la línea 19 se enclavan y desenclavan las memorias B3:0/6 y B3:0/7, para realizar un juego entre ellas que permita activar y desactivar el temporizador T4:2 que enviará pulsos al contador C5:1 y al puerto de entrada de pulsos del motor 1, de esta manera la válvula del motor 1 irá cambiando de posición angular.





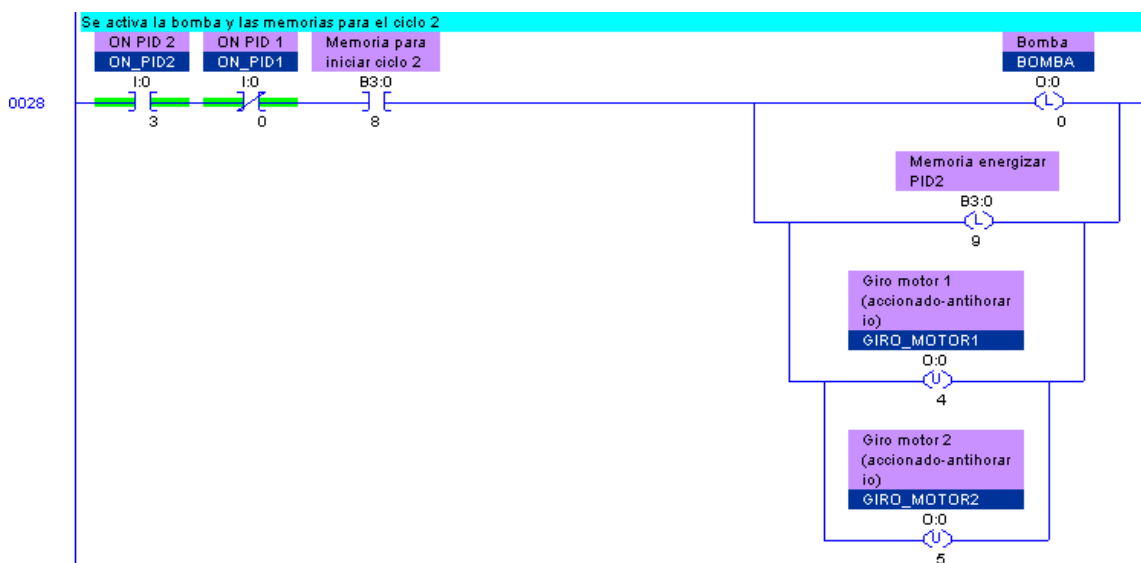




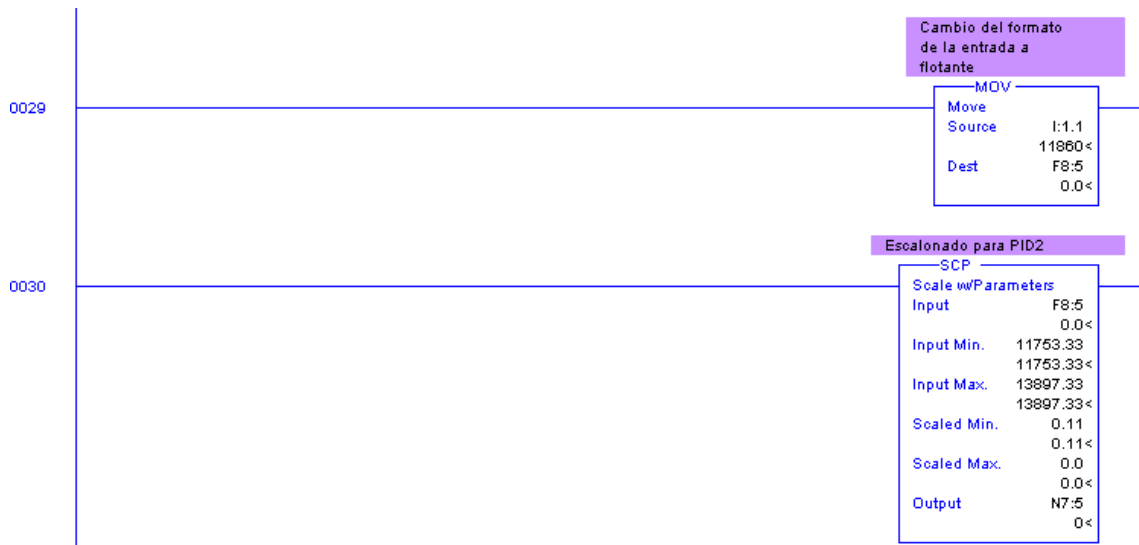
Mediante un juego entre las memorias B3:0/1 y B3:0/2 se irá activando un temporizador durante 8 [ms] (tiempo mínimo para que los motores paso a paso reconozcan la entrada de una señal), el cual al final de su conteo dará la orden de generar un pulso para los motores paso a paso y para un contador C5:0 el cual deberá contar 64 pulsos que corresponderán finalmente a $\frac{1}{4}$ de vuelta de las válvulas.

Una vez que el acumulador del contador llega a igualar el valor determinado (preset), el contador da la orden de desactivar los sentidos de giro de los motores, resetear el contador, enclava la memoria B3:0/8 para iniciar el ciclo 2 y regresar a la línea principal del programa.

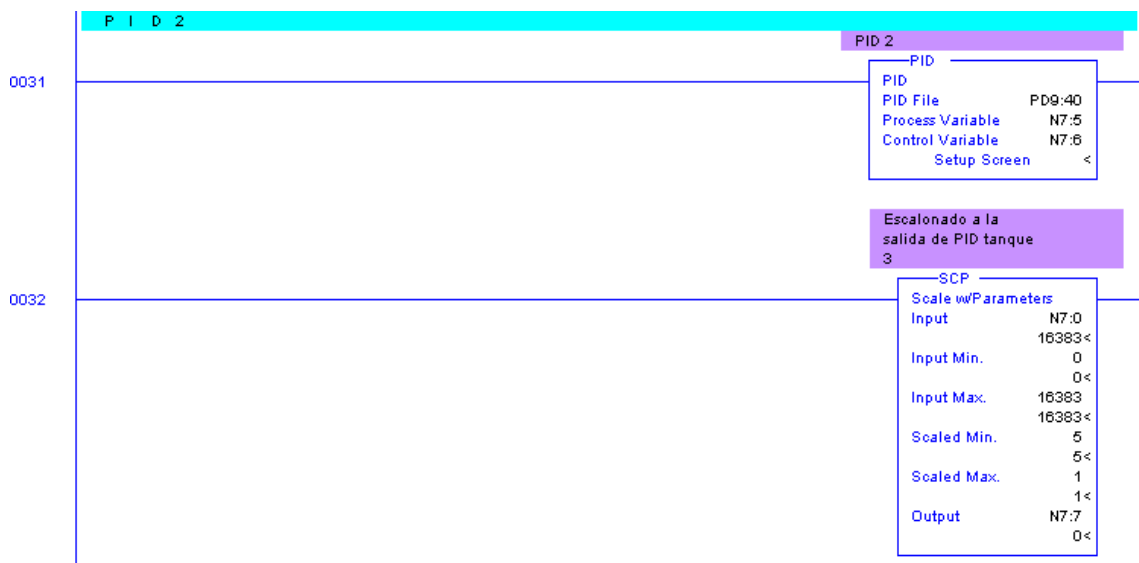
Una vez que se ha regresado a la programación principal, se activará la bomba y ciertas memorias para el inicio del ciclo 2.



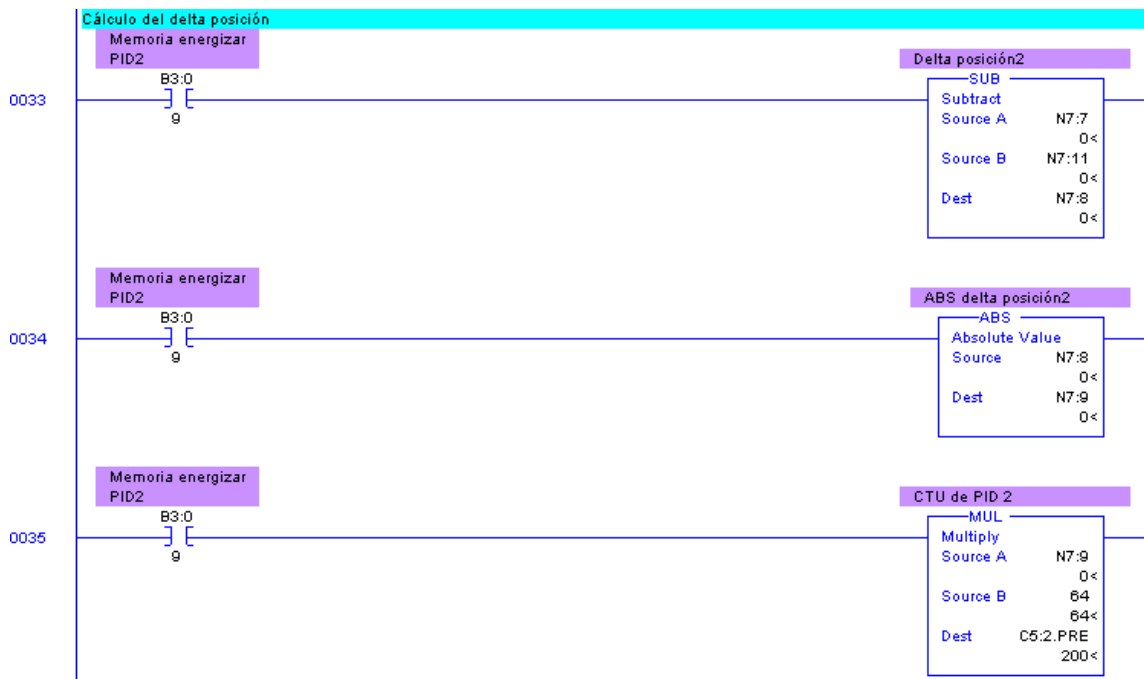
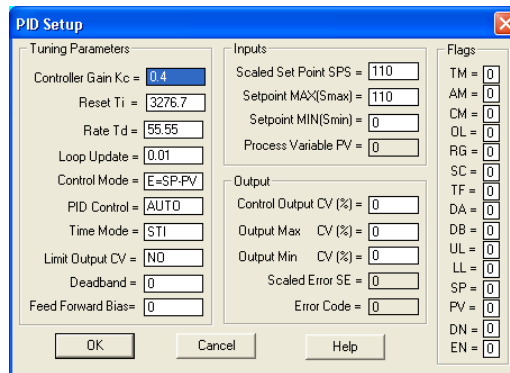
Al presionar nuevamente el botón I:0/3, y una vez enclavada la memoria B3:0/8 se activa la bomba, se energiza una memoria que dará paso al PID 2 y se desenclavan los sentidos de giro de los dos motores (por si en algún momento de la programación hubiesen quedado enclavadas).



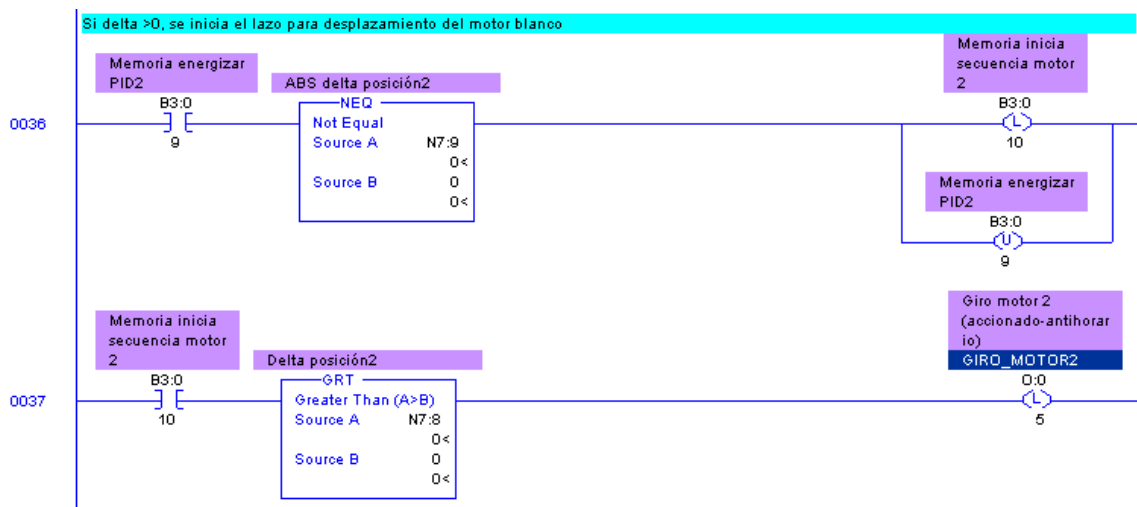
En la línea 29 se toman los valores del sensor flotador del tanque 3 y se los convierte a formato flotante (F8:5). A esta variable, se la escala mediante el comando SCP, ya que para este caso la curva correspondiente sí tiene tendencia lineal. Cabe aclarar que únicamente la entrada analógica del tanque 1 es de voltaje; las entradas analógicas de los tanques 2 y 3 son de corriente.



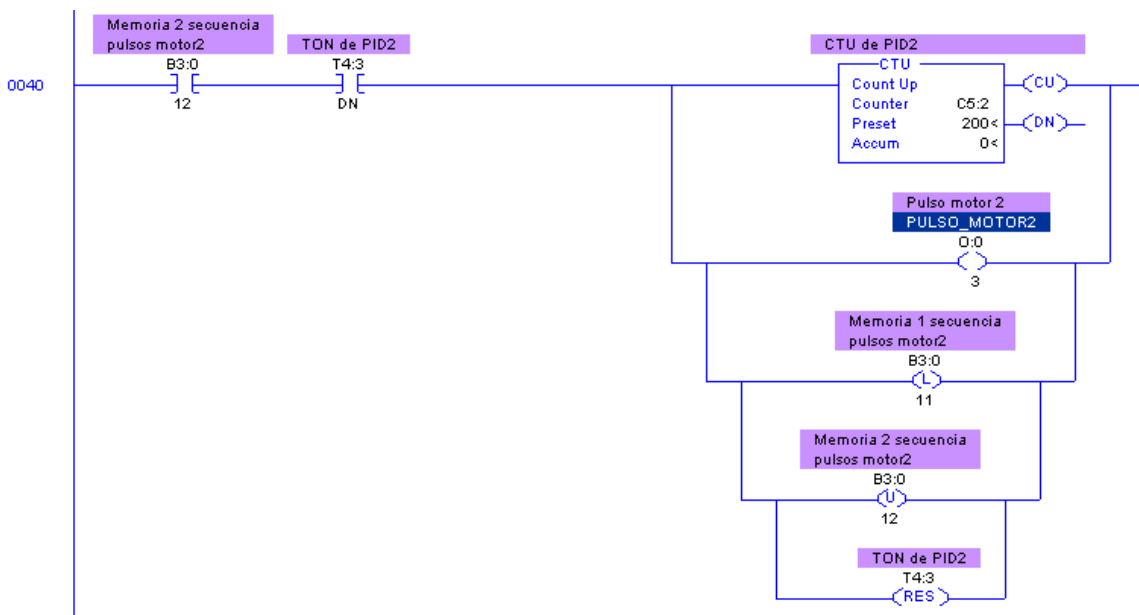
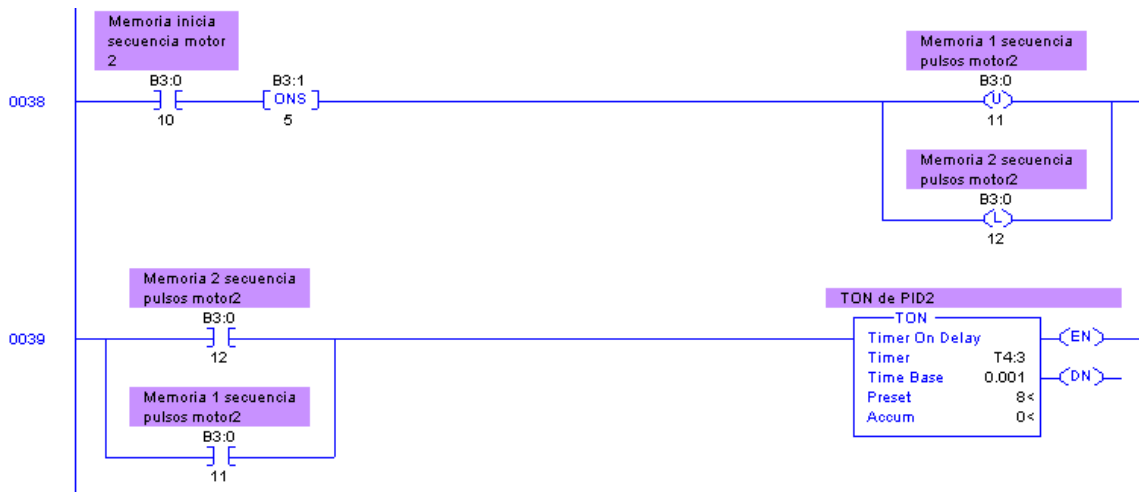
La línea 31 el PID 2. Su variable de proceso es la memoria N7:5 obtenida en el anterior escalamiento. La variable de salida que ya ha sido controlada es N7:6. Esta última es nuevamente escalonada para obtener valores entre 1 y 5 (discretización de datos obtenidos). Donde cada unidad corresponde a ¼ de vuelta. En el siguiente gráfico se muestran los parámetros del PID 2.

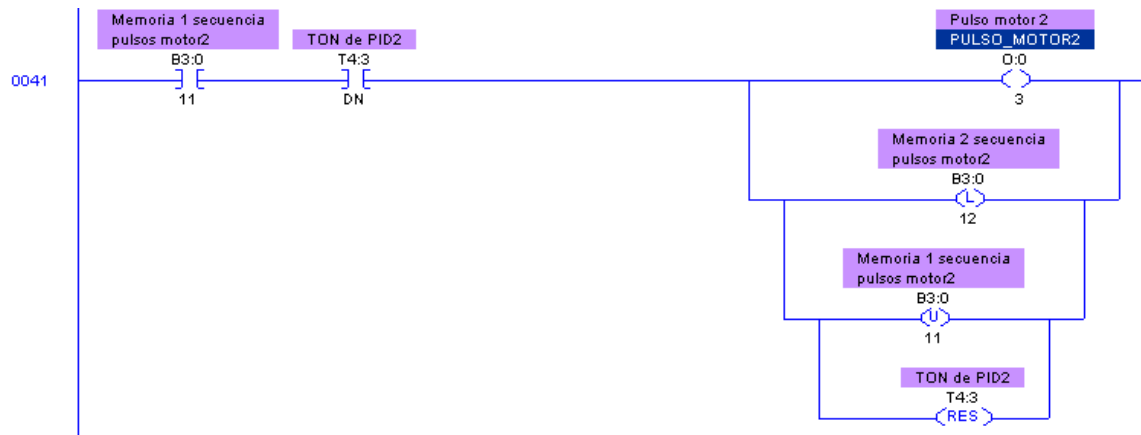


Con este valor discretizado, se procede a calcular la variación de la posición (delta posición) de la válvula. Para lo cual se compara con la posición anterior (1/4 de vuelta debido al encendido inicial) y se extrae su valor absoluto. Este valor es multiplicado por 64 para designarlo como el parámetro Preset del contador C5:2. Es decir este contador deberá contar 64 veces el valor absoluto del delta posición.

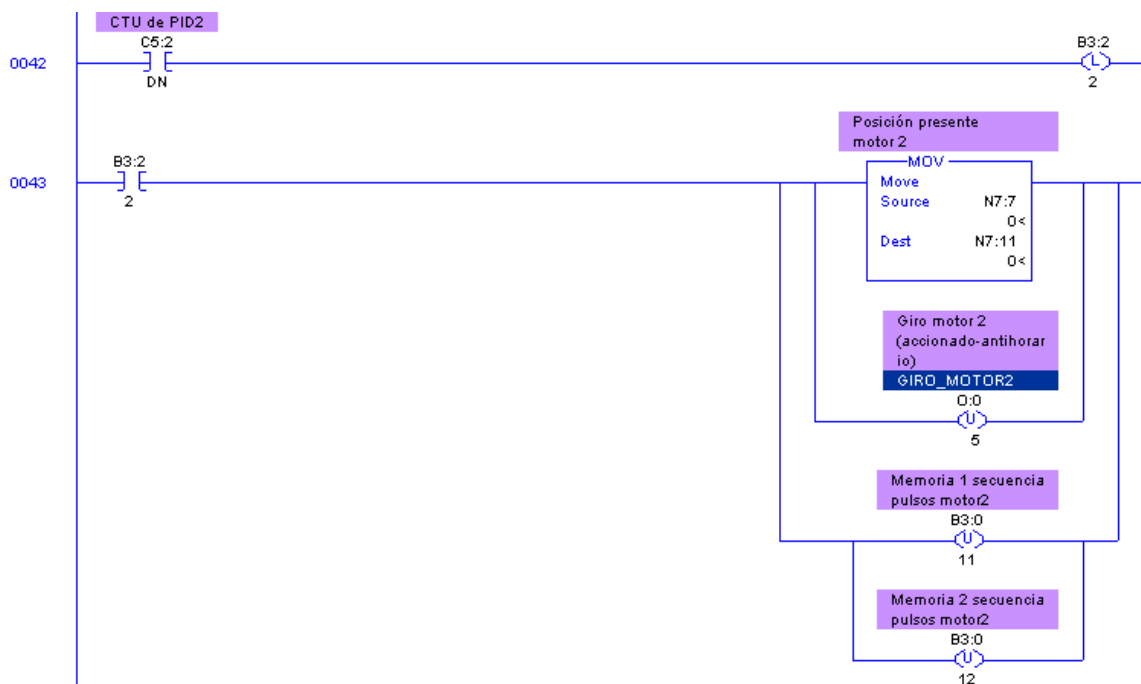


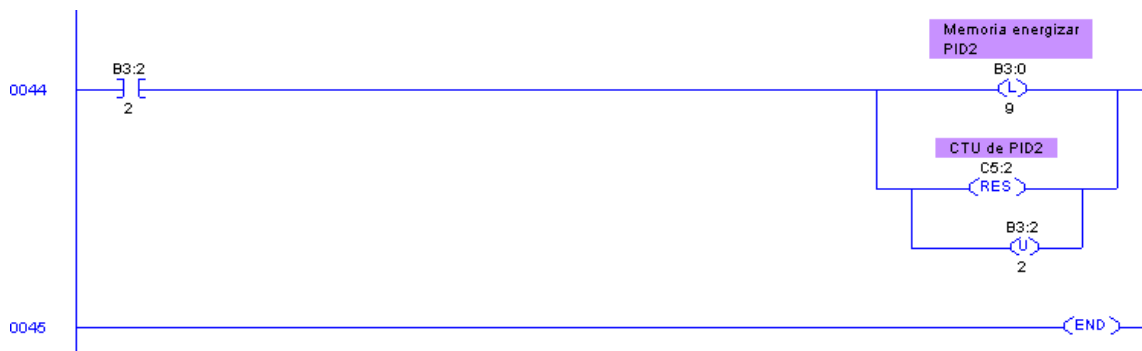
Si el delta obtenido no es igual a 0, se desenchava la memoria que permitía energizar al PID 2, y enchava otra memoria que ayuda en el inicio de la secuencia de pulsos para el motor 2. (Al activar y desactivar las memorias anteriores se logra evitar que ciertas acciones se produzcan incorrectamente al mismo tiempo). Por otra parte, si el delta obtenido (sin valor absoluto) es mayor que 0, se enchava el sentido de giro anti horario del motor 2.





Desde la línea 38 se enclavan y desenclavan las memorias B3:0/11 y B3:0/12, para realizar un juego entre ellas que permita activar y desactivar el temporizador T4:3 que enviará pulsos al contador C5:2 y al puerto de entrada de pulsos del motor 2, de esta manera la válvula del motor 2 irá cambiando de posición angular.





Una vez que el contador C5:2 haya terminado de contar el valor seteado, el valor obtenido en la discretización pasará a ser la nueva posición de la válvula, el sentido de giro se desenclavará al igual que las memorias empleadas, se reseteará el contador C5:2 y se enclavará nuevamente la memoria B3:0/9 para dar paso a una nueva lectura del PID 2.

4.3 DESCARGA DEL PROGRAMA AL PLC

4.3.1 COMUNICACIÓN

Existen dos maneras de comunicar el PLC con una computadora. Una es mediante Ethernet y la otra mediante el puerto RS-232.



Fig. 4-8. Tipos de comunicación entre el PLC y una computadora u otros dispositivos.

Esta comunicación se la debe realizar a través del programa RSLinx, en el cual se debe configurar el tipo de comunicación.

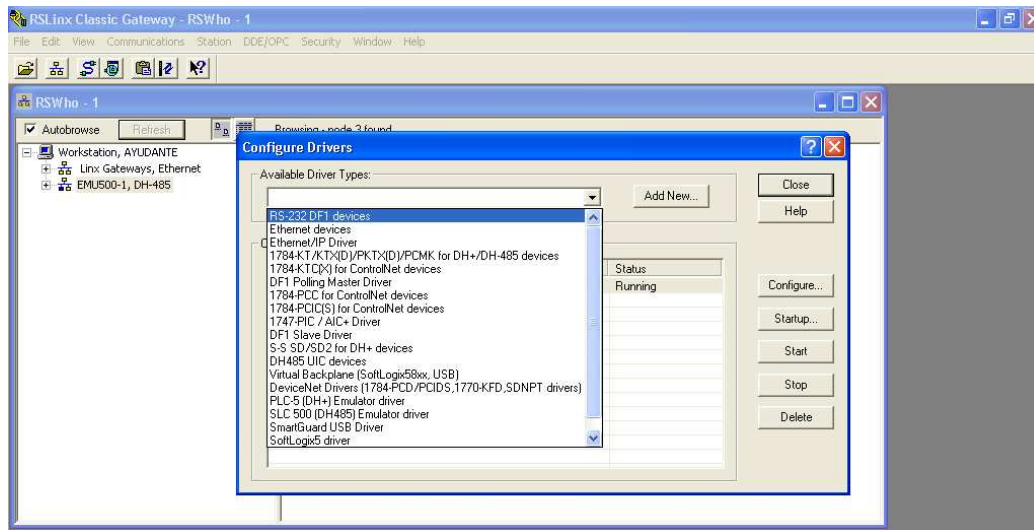


Fig. 4-9. Ventana de RSLinx para la comunicación.

Previamente a la descarga del programa en el PLC, si se requiere el empleo de módulos de expansión, estos deben ser configurados una vez que se haya realizada la conexión con el PLC mediante RSLinx Classic, pero en el estado: Offline.

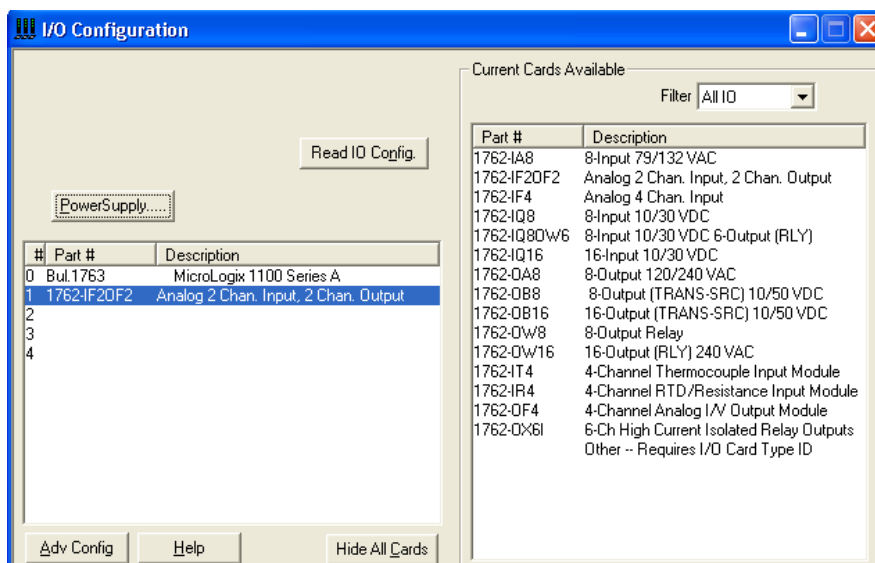


Fig. 4-10. Ventana de configuración de entradas y salidas

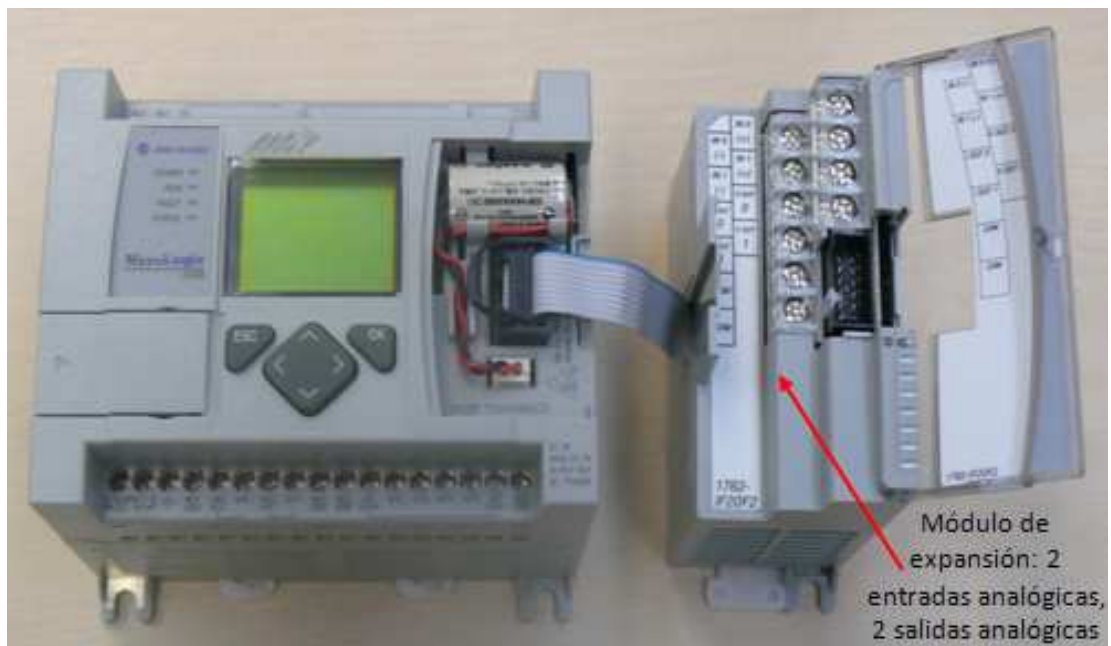


Fig. 4-11. Conexión del módulo de expansión en el PLC

En el caso de los módulos de expansión de entradas y salidas analógicas, las entradas pueden presentarse de dos características, ya sea de voltaje o de corriente, es decir depende de la elección y necesidad del usuario.

Estos módulos de fábrica vienen configurados para trabajar por corriente, pero en la parte superior de su carcasa se encuentran dos interruptores (cada uno representa una entrada) que según la posición en el gráfico siguiente se pueden configurar para que trabajen por voltaje o corriente.

Esta característica debe ser indicada en el momento de realizar la respectiva configuración de entradas y salidas en el PLC.

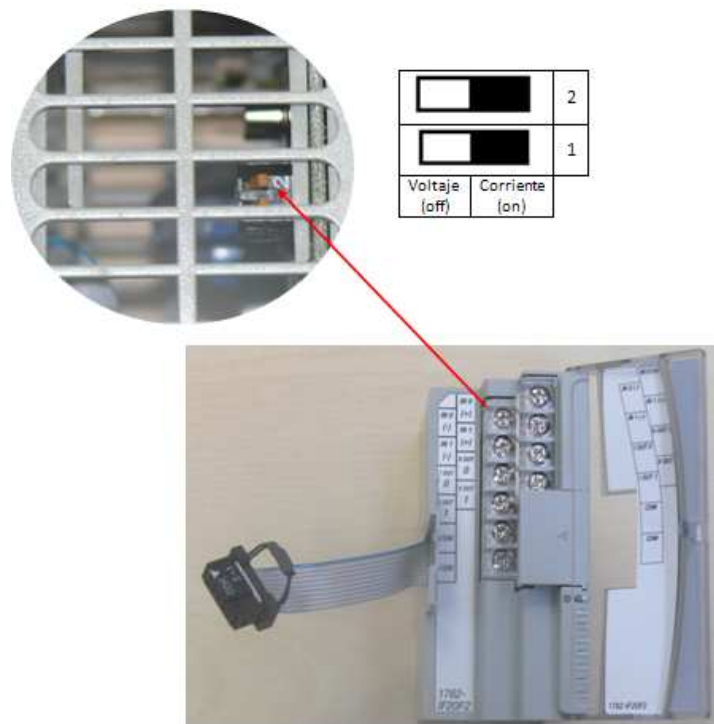


Fig. 4-12. Módulo de entradas y salidas analógicas

4.3.2 DESCARGA DEL PROGRAMA

El siguiente paso una vez que se hayan realizado todas las configuraciones necesarias y el programa haya sido creado, es la compilación de todas las líneas de programación mediante sus funciones: verificar archivo o verificar proyecto para determinar si existe o no algún error en las reglas de la programación.



Fig. 4-13. Comandos empleados para compilar un programa.

Una vez que se haya compilado el proyecto y no existan errores, se puede proceder a la descarga del programa mediante una ventana de estado en la parte superior derecha.

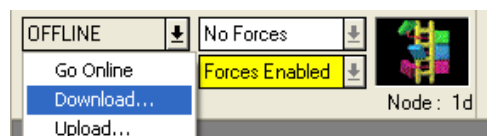


Fig. 4-14. Función para descargar el proyecto.

CAPÍTULO 5

5 PROTOCOLO DE PRUEBAS

El programa para este módulo didáctico contempla la experimentación de 2 controles PID. El uno corresponde al sistema entre el caudal 1 y el tanque 1 (entrada y salida respectivamente). El otro corresponde al sistema entre el caudal 2 y el tanque 3 (entrada y salida respectivamente).

Para cada uno de estos sistemas es posible determinar distintos parámetros de diseño y por lo tanto se pueden encontrar muy distintos valores de los parámetros de control. Antes de sintonizar estos parámetros experimentalmente, es necesario hallarlos previamente (por ejemplo con la ayuda de Matlab) aunque finalmente no resulten precisos.

El programa que controla estos sistemas a pesar de presentar 2 controles PID, son muy semejantes en su procedimiento. Antes de iniciar cualquiera de estos dos controles PID, es necesario encerrar la apertura de las válvulas. Esta acción está definida en las líneas de programación.

CAPÍTULO 6

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 RESULTADOS

La siguiente tabla presenta una comparación entre los resultados teóricos obtenidos mediante la simulación en Matlab y los resultados experimentales.

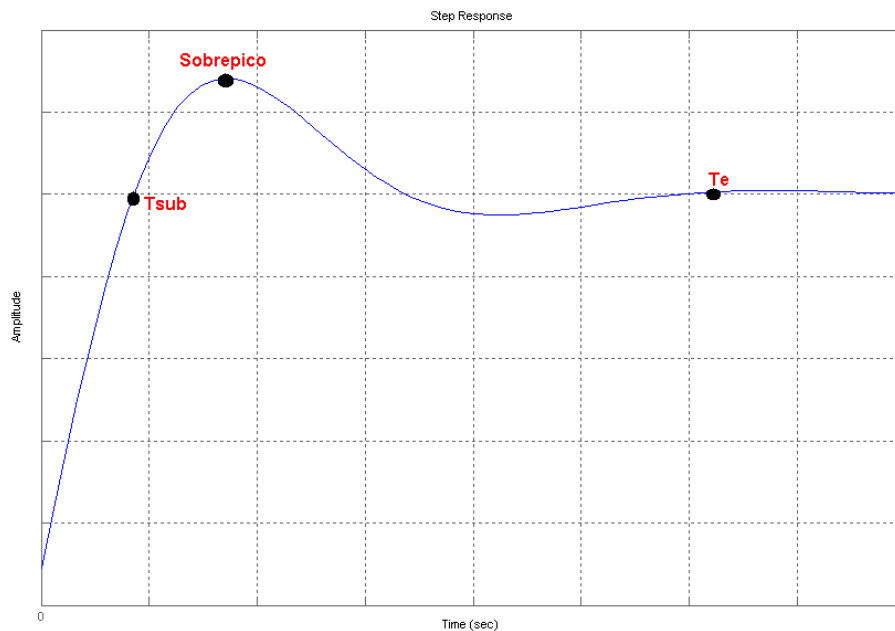


Fig. 6-1. Parámetros a comparar: Sobrepico, Tsub o tiempo de subida y Te o tiempo de estabilización.

Tabla 6-1. Comparación entre los resultados teóricos y los experimentales

| Parámetro | PID 11 | | | PID 23 | | |
|---------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Teórico | Real | e (%) | Teórico | Real | e (%) |
| Tsub (s) | 39,7 | 38 | 4,28 | 106 | 89 | 16,04 |
| Sobrepico (m) | 0,5001 | 0,051 | 89,80 | 0,504 | 0,114 | 77,38 |
| Te (s) | 259 | 148 | 42,86 | 840 | 170 | 79,76 |

El mayor error que se obtuvo se produjo en la magnitud de los sobrepicos, lo cual influyó para que también exista un porcentaje de error apreciable en el tiempo de estabilización. En cuanto al tiempo de subida, no existió gran diferencia entre el resultado teórico y el experimental ya que al abrirse completamente las válvulas el control no tiene influencia directa.

6.2 CONCLUSIONES

De lo anteriormente expuesto se puede concluir que:

- Los entornos de programación de los PLCs de las diversas marcas presentan similitudes esenciales en los lenguajes de programación, ya que estos están normados, pero en la manera de interactuar con el usuario y presentar opciones para la funcionalidad y mejorar la productividad y desarrollo de proyectos, son diferentes.
- La precisión de los flotadores utilizados como sensores para el nivel de los tanques del sistema no es la indicada para alcanzar los valores de error admisible propuestos en el estudio matemático del sistema, añadiendo que es importante que reciban un constante mantenimiento.
- A pesar de que los diferentes elementos del sistema como la tubería y los accesorios son construidos en serie y presentan características físicas normalizadas, al momento de estudiar el sistema real y hacerlo funcionar presentan diferentes comportamientos a condiciones similares de trabajo, que modifican el comportamiento del sistema, como diferentes resistencias hidráulicas que al final determinan variaciones en el caudal que por estos circula. Otros fenómenos como vórtices se presentan, estos no se consideraron en el estudio como perturbaciones al sistema debido a su complicación matemática que está fuera del alcance de este estudio.
- La simulación de procesos y obtención de datos mediante programas de ayuda como Matlab son una buena guía para obtener resultados aproximados, pero hay que tener en cuenta que siempre existirá diferencia entre resultados obtenidos teórica y experimentalmente.

BIBLIOGRAFÍA

- WHITE, F.; Fluid Mechanics; 4th ed.; WCB – McGraw Hill; 1998; U. S. A
- MORAN, M.; Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer; 1st ed.; John Wiley & Sons; U. S. A.
- OGATA, K.; System dynamics; 4th ed.; Pearson – Prentice Hall; 2004; U. S. A.
- OGATA, K.; Dinámica de Sistemas; 1^{ra} ed.; Prentice Hall Hispanoamericana; 1987; México
- MOORE, H.; MatLab® para ingenieros; 1^{ra} ed.; Pearson Education de México; 2007; México
- HUNT; A Guide to MATLAB® for Beginners and Experienced Users Updated for MATLAB® 7 and Simulink® 6; 2nd ed.; Cambridge University Press; 2006; U. S. A.
- DOMÍNGUEZ, S.; Control en el espacio de estado; 2^{da} ed.; Pearson Education; 2006; Madrid
- WILLIAMS, R.; Linear State-Space Control Systems; 1st ed.; John Wiley & Sons; 2007; U. S. A.
- CENGEL, Y.; Termodinámica; 2^{da} ed.; McGraw-Hill; 2001; México
- ASHBY, M.; Materials Selection in Mechanical design; 2nd ed.; Butterworth – Heinemann; 1999; U. K.
- ROSALER, R. ; Manual del Ingeniero de Planta, Tomo 2; 2da ed.; McGraw – Hill; 1998; México
- <http://www.plastigama.com/pdfs/construccion>
- <http://oaq.epn.edu.ec/OAQ/ubicacion.htm>
- <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus.html>
- http://www.dfa.uv.cl/~jura/Fisica_I/semana_XIII_2.pdf
- <http://www.isa.uniovi.es/genia/spanish/inv/iec1131.htm>
- <http://www.geocities.com/icatercera/plc/estandariec.html>
- <http://www.pol.una.py/archivos/IngEltrnik/Sensores/NomenclaturaMetrologica.pdf>
- <http://www.internet.ve/asic/iec1131-3.html>

ANEXOS