



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE UN
MÓDULO EXPERIMENTAL**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A

MANZO MORALES OMAR ENOC

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

M.A. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
1. ANTECEDENTES.....	6
2. MANUAL DEL ALUMNO.	8
2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS.....	8
2.1.1. <i>Sistema de control e identificación del puerto serie.</i>	9
2.1.1.1. Identificación del puerto serie.	10
2.1.2. <i>Etapas de potencia.</i>	13
2.1.3. <i>Bomba hidráulica.</i>	14
2.1.4. <i>Válvulas de seguridad.</i>	15
2.1.4.1. Procedimientos de seguridad.....	16
2.1.5. <i>Encendido del banco de pruebas.</i>	16
2.2. INTERFAZ GRÁFICA.	17
2.2.1. <i>Elementos que componen la interfaz.</i>	18
2.2.1.1. Elementos básicos.	18
2.2.1.2. Indicadores y gráficas.	20
2.2.2. <i>Modos de control.</i>	23
2.2.2.1. Modo manual de flujo constante.	23
2.2.2.2. Modo automático.	24
2.2.2.2.1. Control P.	24
2.2.2.2.2. Control PI.	25
2.2.2.2.3. Control PID.	26
2.3. MODO MANUAL.....	26
2.4. RESUMEN.	29
3. MANUAL DEL PROFESOR.	30
3.1. COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS.	30
3.1.1. <i>Sistemas físicos.</i>	30
3.1.1.1. Sistema hidráulico.	31
3.1.1.2. Sistema de sensado y actuación.....	32
3.1.1.3. Sistema de control.	32
3.1.1.4. Sistema de alimentación de potencia.	33
3.1.2. <i>Interfaz de usuario.</i>	34
3.1.2.1. Modalidades de control.	35
3.1.2.1.1. Modo de flujo constante.....	35
3.1.2.1.2. Modo automático.	36
3.1.2.1.2.1. Control P.	36
3.1.2.1.2.2. Control PI.	37
3.1.2.1.2.3. Control PID.....	37
3.1.2.2. Herramientas de recolección de datos.....	38
3.1.2.2.1. Registro de usuario.	38
3.1.2.2.2. Indicadores.	39
3.1.2.2.3. Gráficos.....	40
3.1.2.3. Botonería.....	41
3.1.3. <i>Modo manual.</i>	43
3.2. CONEXIONES.	47
3.2.1. <i>Conexión del sensor de nivel.</i>	47
3.2.2. <i>Sensores de flujo.</i>	49

3.2.3.	<i>Servomotores.</i>	50
3.2.4.	<i>Placa de montaje superficial.</i>	52
3.2.5.	<i>Realización de las conexiones físicas.</i>	53
3.3.	PUESTA EN MARCHA.	54
3.3.1.	<i>Conexiones básicas.</i>	54
3.3.2.	<i>Procedimientos de seguridad.</i>	54
3.3.3.	<i>Inicio de la operación.</i>	54
3.3.4.	<i>Fin de la operación.</i>	55
3.4.	SOLUCIÓN DE PROBLEMAS.	55
3.4.1.	<i>La PC no detecta el Arduino al conectar el cable.</i>	55
3.4.2.	<i>No fluye agua por las tuberías.</i>	58
3.4.3.	<i>Problemas con los sensores.</i>	60
4.	MANUAL DE PRÁCTICAS.	61
4.1.	PRÁCTICAS.	61
	PRÁCTICA 1: FAMILIARIZACIÓN CON EL BANCO DE PRUEBAS.	61
	PRÁCTICA 2. CONTROL MANUAL.	65
	PRÁCTICA 3: CONTROL PROPORCIONAL.	68
	PRÁCTICA 4: CONTROL PI.	72
	PRÁCTICA 5: CONTROL PID.	75
4.2.	NOTAS PARA EL PROFESOR.	77
5.	MANUAL DE ARMADO DE LA SERVOVÁLVULA.	81
5.1.	MATERIALES Y EQUIPO.	81
5.2.	GENERACIÓN DE PIEZAS DE ACRÍLICO. (OPCIONAL)	84
5.3.	ACONDICIONAMIENTO DE LA VÁLVULA.	84
5.4.	COLOCACIÓN DE LA VÁLVULA EN LA PIEZA INFERIOR.	86
5.5.	ARMADO DE LA PIEZA SUPERIOR.	88
5.6.	ENSAMBLAJE FINAL DE LA SERVOVÁLVULA.	89
6.	MEJORAS Y ADICIONES.	92
6.1.	REDISEÑO DE PIEZAS DE LA SERVOVÁLVULA.	92
6.2.	REDISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO.	96
6.3.	REDISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.	99
6.4.	REFINAMIENTO DEL CÓDIGO.	100
6.5.	DESARROLLO DEL MODO MANUAL.	102
6.6.	IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS Y MANTENIMIENTO.	105
7.	OBSERVACIONES Y POSIBILIDADES DE MEJORA.	109
8.	CONCLUSIONES.	111
9.	GLOSARIO.	114

AGRADECIMIENTOS

Éste documento representa la culminación de una etapa de estudio en mi vida, durante este camino, conté con el respaldo y cariño de muchas personas, a las cuales he tomado el tiempo de expresar mi gratitud por haber enriquecido mi vida y mi formación con sus aportaciones. Agradezco a mis padres, Oscar y Socorro, y mi hermano, Oscar, por su apoyo incondicional, no ha sido un camino exento de dificultades, pero, sin su invaluable amor, habría sido imposible culminar este ciclo, gracias también, por motivarme a perseguir mis metas y anhelos, agradezco infinitamente por tener una familia tan maravillosa, los amo, son un gran motor en mi vida, gracias por su esfuerzo y sacrificio, espero, un día no muy lejano, tener la oportunidad de retribuirles un poco de lo mucho que me han dado. Gracias a mi tía, Leticia, por su respaldo en los momentos más complicados, sin su generosidad esto no habría sido posible. Agradezco a mis abuelos. Lucía y Enoc, por su orientación y cariño, fueron parte importante de este proceso.

Gracias a mi universidad, por permitirme formarme en sus aulas y nutrirme de sus conocimientos, gracias a mis profesores, por haberme brindado su orientación y por su humanidad al compartir sus experiencias conmigo.

Agradezco haber tenido la oportunidad de conocer personas admirables con quienes he tenido el privilegio de formar lazos de amistad que estoy seguro, nos unirán por siempre. Gracias Marco, por acompañarme en este recorrido, juntos logramos sortear todos los retos que se nos presentaron, gracias también por la confianza, te deseo mucho éxito en todos los proyectos que emprendas, cuentas con mi apoyo. Gracias Saray, por escucharme en los momentos más difíciles, por orientarme y ayudarme a encontrar motivación para seguir adelante, te deseo una vida llena de logros y aprendizajes, estaré contigo para acompañarte. Gracias Ale, por darme los mejores consejos, por los inolvidables momentos compartidos, deseo que conquistes con éxito todos tus objetivos. Gracias Ingrid, por tu comprensión y apoyo, te considero casi una hermana, te deseo una vida llena de felicidad. Gracias Carla, por los momentos de diversión, por la paciencia y por estar a pesar del tiempo, espero que nuestra larga amistad continúe por mucho más.

Quiero agradecer especialmente al asesor de este trabajo, M.A. Luis Yair Bautista Blanco, y a la profesora, M. I. María Rafaela Gutiérrez Lara, por su aporte al desarrollo de éste proyecto, con su guía, soporte y colaboración, me brindaron las herramientas necesarias para el desarrollo de la presente obra.

Agradezco también a los demás integrantes del jurado, M. F. Alicia Pineda Ramírez, Dra. María del Pilar Corona Lira e Ing. Said Ulises Pérez Sierra, ya que con sus observaciones contribuyeron a enriquecer este documento.

Quiero dar gracias a todas las personas, que, en mayor o menor medida, influyeron en mi formación y en especial durante la realización de éstos manuales, y que no he tenido oportunidad de mencionar, gracias por su apoyo en los momentos gratos y también en los de tensión, estrés y ansiedad que viví durante estos meses.

Agradezco finalmente al lector, por permitirme compartir mis conocimientos y experiencia e influir en su proceso de aprendizaje.

A todos muchas gracias.

Omar Enoc Manzo Morales.

Ciudad de México, junio de 2019.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, en particular al proyecto PE101717, por su apoyo para la realización de este trabajo de titulación.

1. Antecedentes

El banco de Pruebas para las materias de instrumentación y dinámica de procesos es un producto del proyecto PAPIME PE101717 desarrollado en conjunto con la Facultad de Química de la UNAM. Dicho proyecto consistió en la fabricación de un módulo experimental con la finalidad de representar una situación común donde se implementen acciones de control manual y automatizado para estabilizar el sistema y caracterizarlo, para ello se diseñó el Banco de Pruebas de Control al que se hará alusión durante este trabajo, el equipo consta de un sistema hidráulico donde las acciones de control están encaminadas a estabilizar la altura de una columna de agua, adicionalmente, el banco cuenta con sistemas que permiten medir en tiempo real variables como la altura y los flujos de entrada y salida, además, las acciones de control se realizan al modificar el grado de apertura de dos servoválvulas, una para controlar el flujo de entrada y la otra para el de salida.

Durante la instrumentación del equipo se han generado dos materiales que han permitido la titulación de sus autores, uno de ellos perteneciente a la facultad de Ingeniería y el otro a la facultad de Química.

La tesis elaborada por el Ing. Víctor Ramírez Salinas y que lleva como título "Desarrollo de la ingeniería básica para un sistema propuesto de Dinámica y Control para el laboratorio de Ingeniería Química IV" registra el diseño del sistema hidráulico, así como el análisis y una aproximación por métodos experimentales al modelado matemático del banco de pruebas, gracias a la información generada en este trabajo, fue posible implementar el control PID en el banco de pruebas.

El material didáctico titulado "Instrumentación y actualización de un banco de pruebas para las materias de Instrumentación y Dinámica de procesos" elaborado por el Ing. Said Ulises Pérez Sierra, documenta el proceso de implementación del banco de pruebas, abarca la selección de los sensores y actuadores, el diseño de las servoválvulas, la instrumentación de todos los elementos en el banco y la elaboración de la interfaz gráfica.

Tomando como punto de partida la información proporcionada por ambos documentos, se decidió elaborar cuatro materiales didácticos.

El primero es un manual dirigido al alumno, donde se combinan conceptos de control e instrumentación con directrices orientadas a propiciar la familiarización con el funcionamiento del banco y la operación segura de éste. Dicho manual está

dividido en dos secciones principales, "Acondicionamiento del banco de pruebas" e "Interfaz gráfica", la primera presenta los sistemas principales que componen el banco de pruebas, las conexiones necesarias para iniciar su operación y los procedimientos de seguridad para evitar daños en los componentes electrónicos ocasionados por un posible desbordamiento de la columna de agua o fuga en alguna tubería, la segunda hace un repaso por cada uno de los elementos que componen la interfaz y los modos de control bajo los que puede operarse el banco de pruebas.

El segundo es un manual para el profesor, en este se propició un enfoque más técnico dirigido que el docente domine el funcionamiento del banco, conozca la configuración de la interfaz y además cuente con herramientas que le permitan detectar y solucionar los posibles problemas que surjan durante la operación del banco. Está dividido en cuatro secciones, "Componentes del banco de pruebas", "Conexiones", "Puesta en marcha", y "Solución de problemas".

El tercero es un manual de prácticas, en este se presentan las instrucciones para el desarrollo de cinco prácticas enfocadas en la experimentación con distintos esquemas de control de lazo abierto y lazo cerrado, en cada una se presenta un formato para registrar los resultados obtenidos, y una serie de preguntas enfocadas en propiciar el análisis de resultados, adicionalmente, se presentan algunas sugerencias para orientar al profesor durante la realización de cada práctica.

Por último, el cuarto es el manual de armado de la servoválvula, al ser este elemento el de mayor importancia para el funcionamiento del equipo y al tener una mayor incidencia de fallos, se decidió proporcionar este material para apoyar las labores de mantenimiento correctivo y preventivo del banco y a su vez, sentar un precedente para detectar ineficiencias en el proceso y proponer modificaciones.

Durante el desarrollo de éste documento y la implementación de dos módulos, se detectaron algunos inconvenientes que influían en la incidencia de fallas, en consecuencia, se implementaron algunas modificaciones para hacer más eficiente la construcción y operación del banco. En la sección "Mejoras y adiciones" se documenta lo mencionado anteriormente. Además, en la sección "Observaciones y posibilidades de mejora" se incluyen comentarios sobre los resultados de este material didáctico y sugerencias para futuras iteraciones del proyecto. Finalmente, se incluyen las conclusiones personales y un glosario para facilitar la comprensión de algunos términos empleados en el documento.

2. Manual del alumno.

2.1. Acondicionamiento del banco de Pruebas.

El objetivo de esta sección es presentar un procedimiento básico para iniciar la operación del banco de pruebas.

El banco de pruebas cuenta con tres elementos que requieren conexiones:

- El sistema de control: su función es gobernar el accionamiento de las válvulas y recibir información proveniente de los sensores que componen la unidad. (Dentro del gabinete <color naranja, Fig. 1>)
- La etapa de potencia: provee energía eléctrica a los servomotores que accionan las válvulas. (Dentro del gabinete <color naranja, Fig. 1>)
- La bomba hidráulica: se encarga de impulsar el fluido de trabajo a través de las tuberías. (Dentro del tanque <color rojo, Fig. 1>)

En adición a esto, se debe prestar atención a la posición las válvulas de seguridad, cuya función principal es proveer de un mecanismo a través del cual se evite el desbordamiento de la columna o posibles daños a la bomba hidráulica.

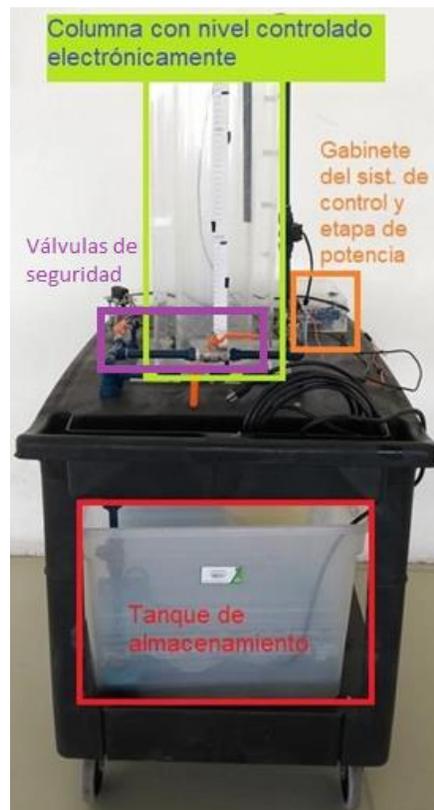


Fig. 1 Elementos que componen el banco de pruebas

2.1.1. Sistema de control e identificación del puerto serie.

El banco de pruebas se controla con una interfaz gráfica que se ejecuta en una PC. Como se mencionó con anterioridad, la función básica de este sistema es servir como puente de comunicación entre la computadora y el banco de pruebas, para ello es necesaria una conexión serial, en resumen, a través de un puerto USB.

Por tal motivo, el primer paso es identificar el cable USB que proviene del gabinete de acrílico (señalado en Fig. 1) y conectarlo a uno de los puertos de la PC.



Fig. 2. Ubicación y apariencia del cable USB del sistema de control.

NOTA: Al conectar el cable, es posible que en la computadora aparezca una notificación o un cuadro de diálogo con la leyenda "Instalando software controlador de dispositivo", se recomienda esperar a que el proceso finalice o que, en su defecto, el sistema notifique que el dispositivo está listo para usarse.



Fig. 3. Posible cuadro de diálogo o notificación.

En caso de que se muestre el cuadro de la Fig. 3, seleccione la opción "Instalar" y espere que el proceso finalice.

2.1.1.1. Identificación del puerto serie.

Para el correcto funcionamiento de la interfaz gráfica es de vital importancia identificar el nombre del puerto serie al que se ha conectado el sistema de control.

Dependiendo del sistema operativo de la computadora se procederá a lo siguiente:

-Windows 10.

- 1) Clic derecho en el botón de inicio, o escribir en la barra de búsquedas "Administrador de dispositivos".

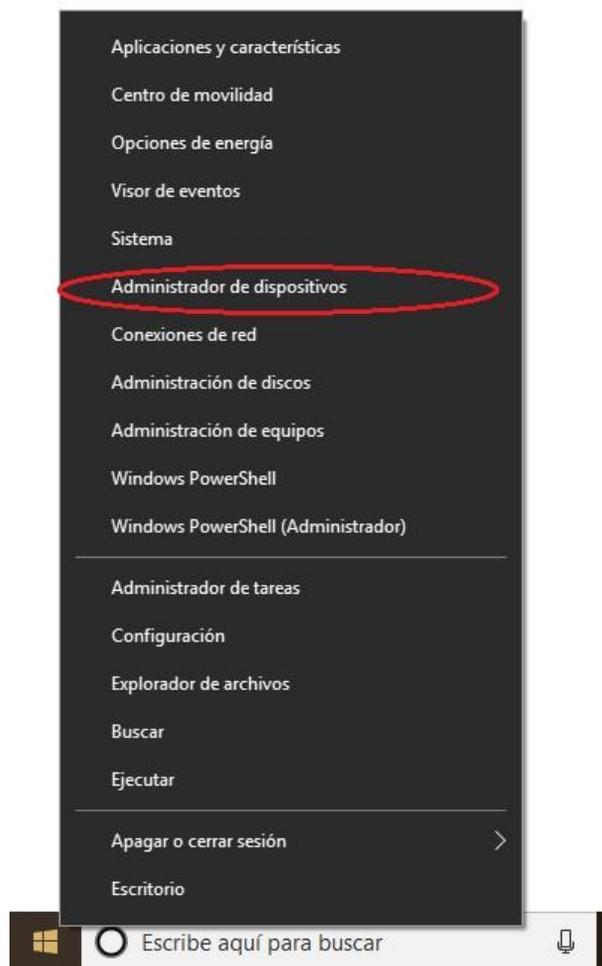


Fig. 4. Opciones del botón inicio

- 2) Seleccionar la opción "Administrador de dispositivos"

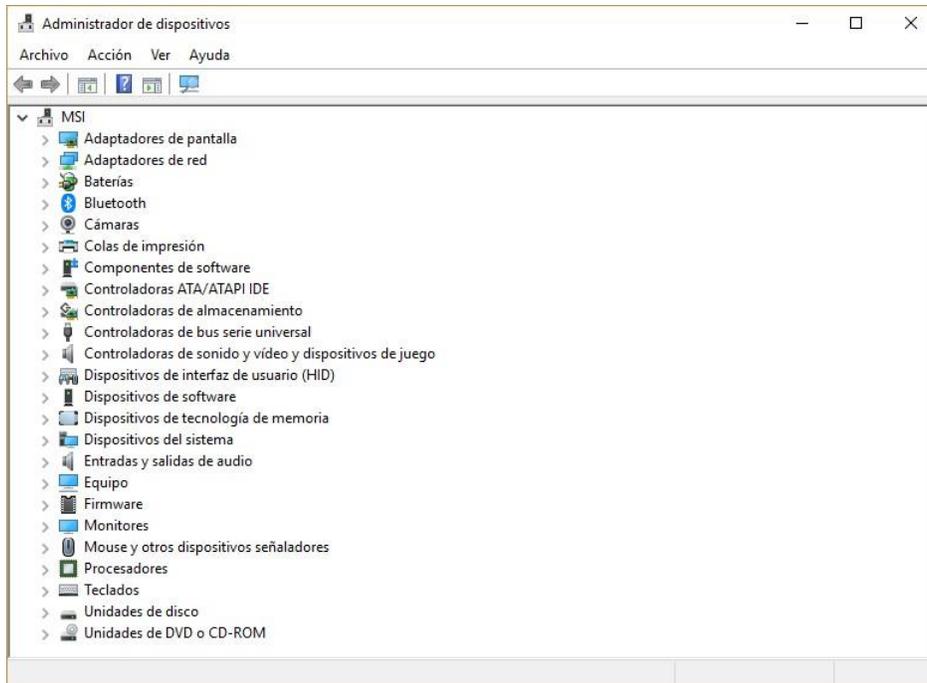


Fig. 5. Ventana del administrador de dispositivos.

- 3) Desplegar la lista "Puertos COM y LPT", si la conexión se realizó exitosamente, la ventana se parecerá a la Fig. 6.

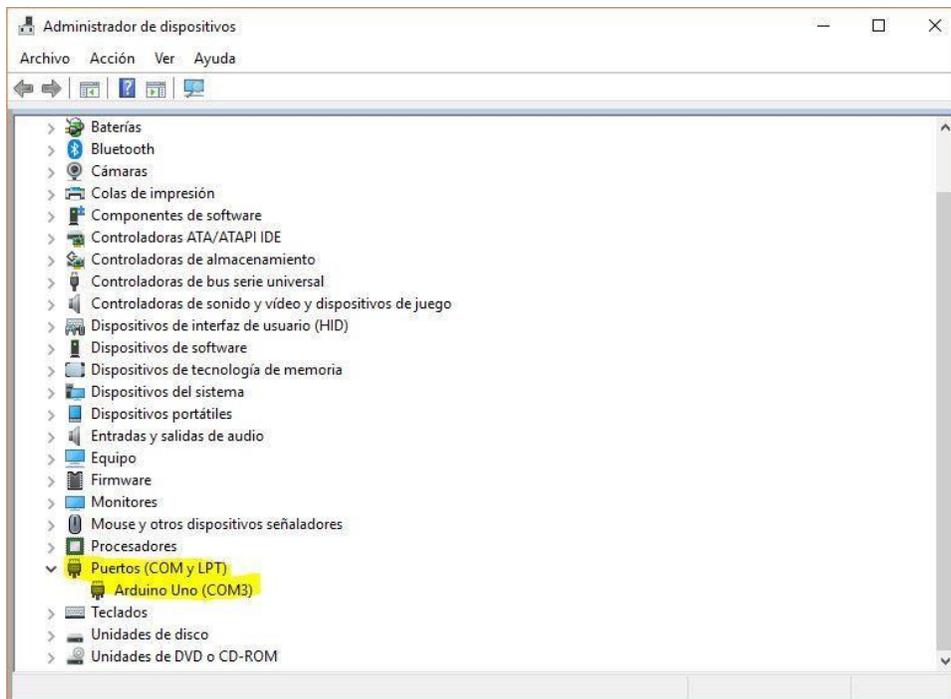


Fig. 6. Administrador de dispositivos, se muestra el puerto COM asignado a la placa Arduino Uno.

Se sugiere anotar el puerto COM asignado por nuestro equipo a la placa Arduino Uno ya que al momento de ejecutar la interfaz gráfica le será solicitado. En el caso de la Fig. 6, el equipo asignó el puerto COM3.

-Windows 7.

Este procedimiento se realiza de forma similar en Windows 7, a excepción del paso 1), en este caso, se debe abrir el menú inicio, posteriormente seleccionar "Panel de control", a continuación, seleccionar "Hardware y Sonido", y finalmente seleccionar "Administrador de dispositivos", es posible que tenga que otorgar permisos de administrador para realizar esta acción (Ver Fig. 7 y Fig. 8).

Después de haber abierto el administrador de dispositivos, salte al paso 3 del procedimiento para Windows 10.



Fig. 7. Ventana del panel de control en Windows 7.

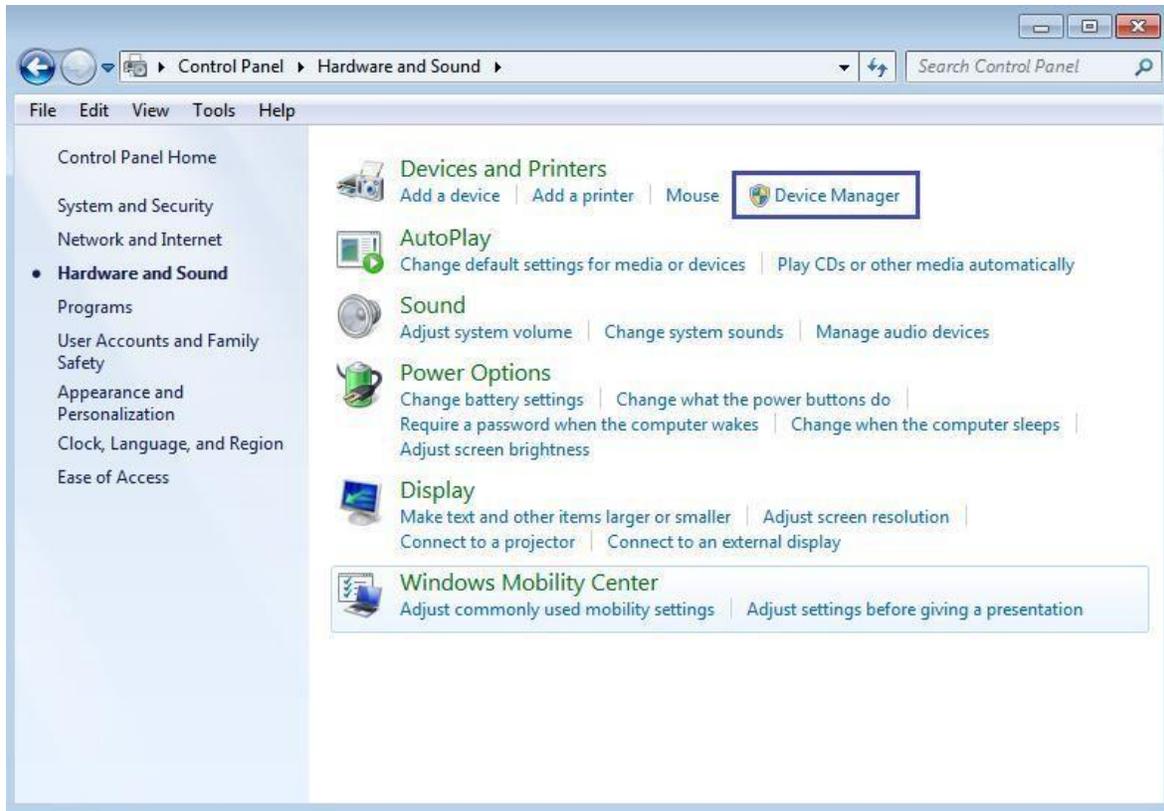


Fig. 8. Apartado "Hardware y sonido" del panel de control en Windows 7.

2.1.2. Etapa de potencia.

Este sistema está compuesto por una fuente de voltaje que proporciona la energía eléctrica necesaria para el correcto funcionamiento de los servomotores, un driver que se encarga de enviar las señales que abren o cierran las válvulas, para ello requiere una conexión de 110 Volts CA, es decir, se conecta a una toma de corriente convencional. Dicho cable sale del gabinete de acrílico (Fig. 1, recuadro color naranja) como se observa en la Fig. 9.



Fig. 9. Cable de alimentación de la fuente de voltaje.

NOTA: La etapa de potencia cuenta con un interruptor de seguridad, se recomienda mantener este interruptor en su posición abierta (apagado) mientras no se esté utilizando el programa de control del banco de pruebas, acciónelo únicamente cuando se desee llenar la columna de acrílico.



Fig. 10. Interruptor de seguridad, O representa la posición abierta (no hay paso de corriente eléctrica), por el contrario | representa la posición cerrada (hay paso de corriente).

2.1.3. Bomba hidráulica.

La bomba hidráulica se encuentra dentro del tanque de almacenamiento de agua (Fig. 1, recuadro color rojo), al igual que el apartado anterior únicamente se requiere conectar el cable de alimentación (110V CA) a la toma de corriente eléctrica convencional.



Fig. 11. Ubicación de la bomba hidráulica.

Sólo conecte la bomba cuando necesite flujo de agua en las tuberías, si desea mantener la bomba conectada, se recomienda leer primero los procedimientos asociados a las válvulas de seguridad. (Ver sección 1.4).

NOTA: Para el correcto funcionamiento de la bomba hidráulica se sugiere que el tanque de almacenamiento esté lo suficientemente lleno, de tal manera que la bomba se encuentre totalmente sumergida en todo momento. En caso de que no sea así, rellene el tanque.

2.1.4. Válvulas de seguridad.

El banco de pruebas cuenta con dos válvulas de accionamiento manual cuya función es evitar el desbordamiento de la columna de agua o que alguna fuga en las tuberías pueda dañar los componentes electrónicos del banco.

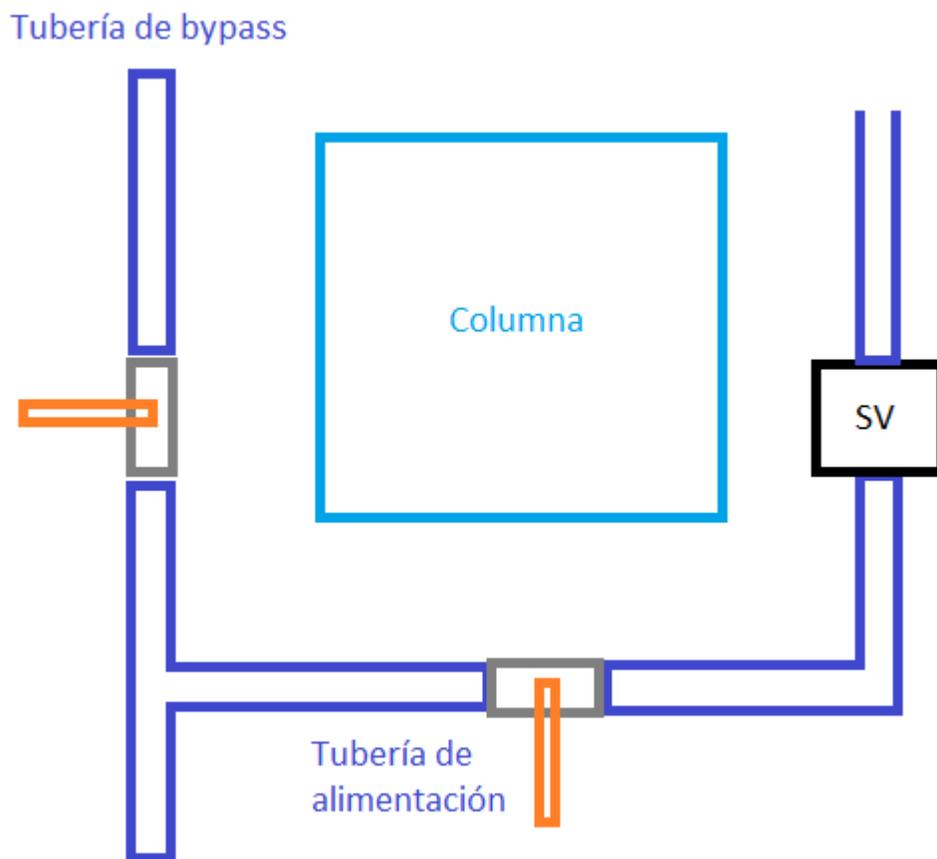


Fig. 12. Vista superior del banco de pruebas, se muestran las válvulas de bypass y alimentación, así como la servoválvula superior.

Como puede verse en la imagen anterior, el banco de pruebas cuenta con dos tuberías principales, la tubería de bypass y la de alimentación, la primera provee al banco de una desviación para el flujo proveniente de la bomba para evitar que se

dañe si se obstruye el flujo en la tubería de alimentación, esta última se encarga de transportar el agua hacia la columna.

2.1.4.1. Procedimientos de seguridad.

- a) Para la operación normal del banco de pruebas se recomienda abrir completamente la válvula ubicada en la tubería de alimentación y cerrar la válvula de bypass, ésta última puede abrirse parcial o totalmente para reducir la velocidad de llenado de la columna.
- b) Si se desea hacer una pausa en la operación del banco sin desconectar la bomba se debe cerrar totalmente la válvula de alimentación e inmediatamente abrir completamente la válvula de bypass, de esta forma el fluido permanecerá circulando únicamente a través de la bomba y la tubería de bypass. Para reiniciar la operación realice el procedimiento a).
- c) Para evitar daños en la bomba o en las tuberías, nunca mantenga ambas válvulas cerradas mientras la bomba se encuentra energizada.
- d) En caso de que la columna se desborde realice el procedimiento b). La columna cuenta con dos secciones, si se desborda la sección interior, la exterior comenzará a captar el agua y la devolverá al tanque de alimentación, para evitar problemas realice el procedimiento al desbordarse la columna interior.

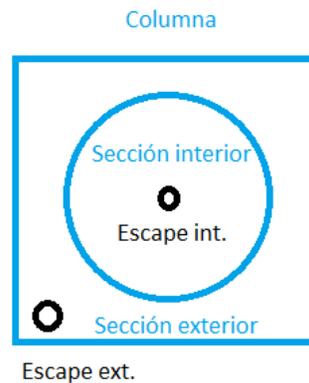


Fig. 13. Secciones que componen la columna del banco de pruebas.

2.1.5. Encendido del banco de pruebas.

Una vez realizadas las conexiones y los procedimientos de seguridad, el banco de pruebas puede empezar a utilizarse abriendo el programa "GUIServines.exe" en la PC, en la siguiente sección se explicará a detalle los elementos que conforman esta interfaz y los modos de funcionamiento del banco de pruebas

2.2. Interfaz gráfica.

Al ejecutar el programa "GUIServines.exe" aparecerá una ventana como la que se muestra en la Fig. 14.

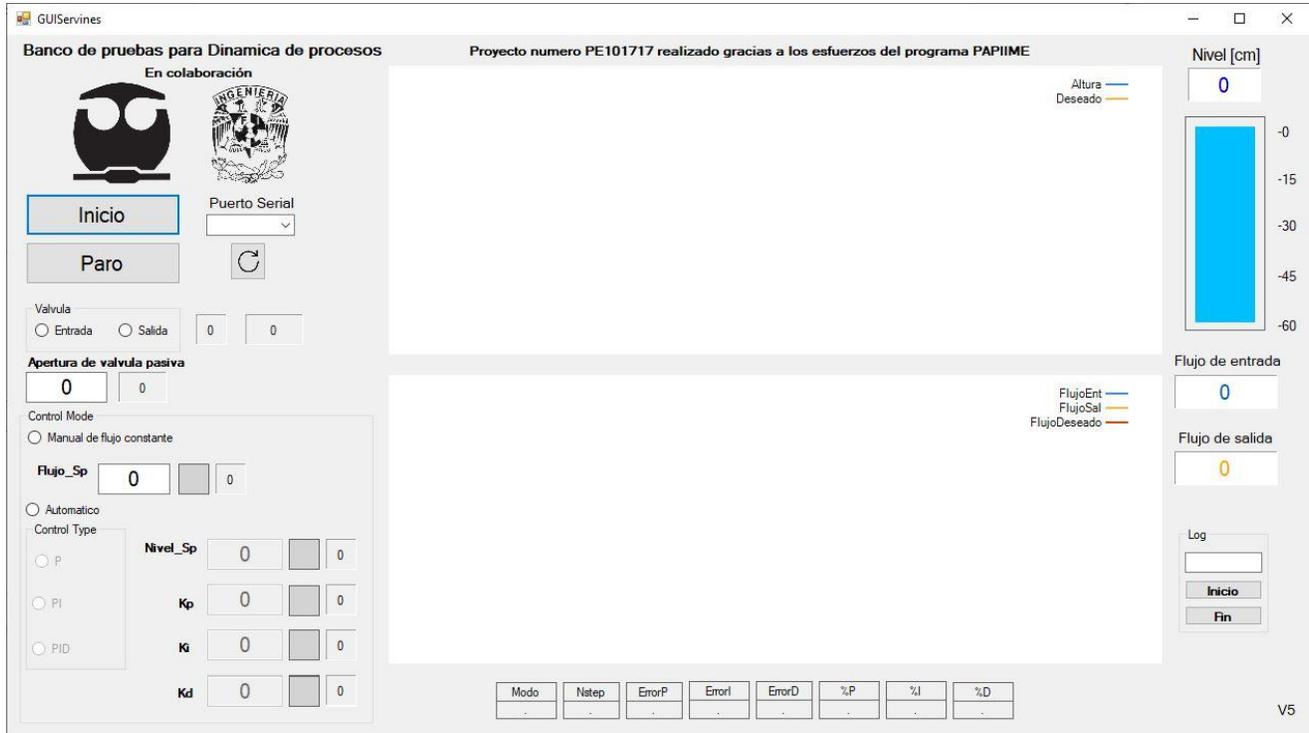


Fig. 14. Ventana del programa GUIServines.

El botón de inicio comienza la ejecución de las secuencias de control, sin embargo, antes de presionarlo es necesario configurar las distintas preferencias que se desean aplicar en el funcionamiento del banco de pruebas. El botón de paro cierra la comunicación con el sistema de control y automáticamente cierra la interfaz. La interfaz también puede cerrarse haciendo clic en el botón correspondiente de la barra de título de la ventana.

2.2.1. Elementos que componen la interfaz.

2.2.1.1. Elementos básicos.

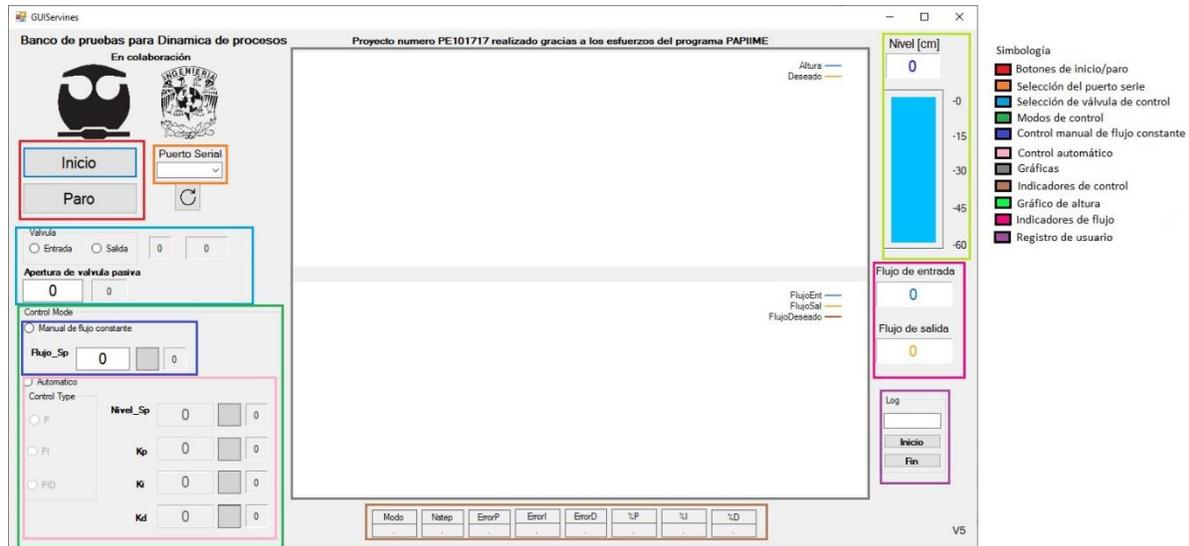


Fig. 15. División de la interfaz por secciones

-Registro de usuario.

Esta sección de la interfaz permite registrar todos los datos obtenidos por los sensores de flujo y de nivel durante el tiempo en que se utilizó el banco de pruebas, generando archivos de texto con los datos antes mencionados. Para hacer uso de esta función, únicamente se requiere introducir en el recuadro el nombre que se desea asignar al archivo generado durante la sesión y oprimir el botón "inicio" (el sistema emitirá un cuadro de diálogo con la leyenda "Empieza log"). Si en algún momento se desea dejar de almacenar datos, se debe seleccionar el botón "Fin" (el sistema notificará al usuario a través de un cuadro de diálogo con la leyenda "Termina log").



Fig. 16. Sección "Log" (Registro de usuario).

-Selección del puerto serial.

Para el funcionamiento de la interfaz es de vital importancia seleccionar en el cuadro desplegable el puerto serial asignado por la PC a la placa Arduino Uno, si tiene dudas

respecto a cómo identificar este puerto consulte la sección 1.1.1. El sistema por defecto identifica todos los puertos seriales de la computadora, sin embargo, se requiere desplegar el cuadro y seleccionar manualmente el puerto correcto.

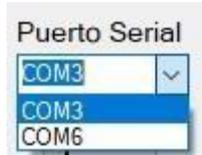


Fig. 17. Cuadro desplegable de selección de puerto serial.

Dentro de esta sección se incluye también el botón "Reset", esta opción reinicia todos los elementos de la interfaz, por lo que regresan a su estado inicial.

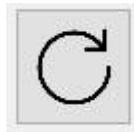


Fig. 18. Apariencia del botón "Reset".

-Selección de la válvula de control.

El banco de pruebas cuenta con dos servoválvulas que permiten ajustar los flujos de entrada y salida. La acción de control se realiza por medio de la regulación de una de estas válvulas, a la cual se le denomina "válvula activa", debido a que es la que estará cambiando automáticamente su apertura para lograr el nivel deseado, la válvula restante tendrá una apertura fija definida por el usuario, por lo que se le denomina "válvula pasiva".

En esta zona (Fig. 19) el usuario determina cuál de las dos válvulas fungirá como "activa", marcando el círculo que corresponde a la válvula deseada.



Fig. 19. Selección de válvula de control.

Cabe mencionar que en los recuadros del lado derecho (Fig. 19) se muestran algunas variables de control para facilitar la rápida identificación del modo de trabajo, en el primero (de izquierda a derecha) se asigna un "1" cuando se selecciona la válvula de entrada o un "2" cuando se elige la de salida, en el segundo cuadro se visualiza la apertura de la válvula seleccionada en grados.

Debajo de la sección "Válvula" se encuentra la opción "Apertura de válvula pasiva" cuya función es definir la magnitud fija, en grados sexagesimales, que se abrirá esta válvula, para lo cual es necesario teclear dicho valor en el recuadro de la izquierda

(Fig. 20). El recuadro de la derecha confirma el valor ingresado. El valor ingresado debe ser un número entero, de lo contrario, el sistema enviará un mensaje de error.

Apertura de válvula pasiva

45	45
----	----

Fig. 20. Apertura de válvula pasiva.

NOTA: El valor ingresado en "Apertura de válvula pasiva" debe estar en un rango de 0 a 90 grados para evitar dañar el servomotor acoplado a la válvula.

2.2.1.2. Indicadores y gráficas.

-Gráfica de altura vs tiempo.

Al hacer clic en el botón de inicio, el programa comienza a registrar automáticamente en esta grafica los datos de altura obtenidos por el sensor, cabe mencionar que esta gráfica es dinámica, por lo que cuando ocupa toda el área comienza a recorrerse, ajustando la escala según los valores que se tengan en todo momento. Si se ejecuta en modo automático, la gráfica mostrará en todo momento el valor de altura deseado.

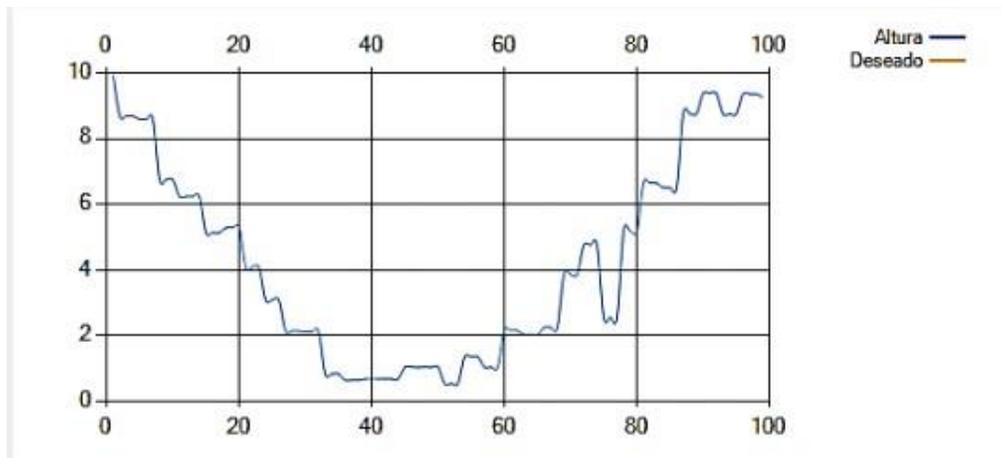


Fig. 21. Ejemplo de gráfica obtenida al ejecutar el programa en modo manual.

-Gráfica de flujo vs tiempo.

Al igual que en el apartado anterior, si se hace clic en el botón de inicio, el programa comienza a registrar automáticamente los datos de flujo reportados por los sensores de entrada y salida, el comportamiento de esta gráfica también es dinámico. Si se ejecuta en modo manual, la gráfica mostrará en todo momento el valor de flujo deseado.

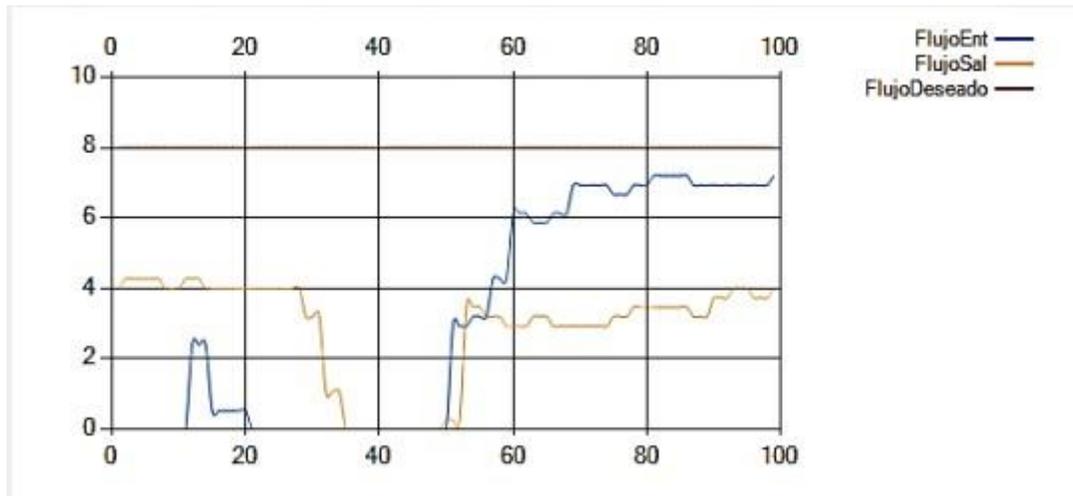


Fig. 22. Ejemplo de gráfica obtenida al ejecutar el programa en modo manual.

-Indicadores de valores de control.

Modo	Nstep	ErrorP	ErrorI	ErrorD	%P	%I	%D
.

Fig. 23. Cuadro de indicadores.

- Modo: Puede adquirir dos valores, "1" si se trata del modo manual y "2" si se ejecuta el modo automático.
- Nstep: Indicador reservado para actividades de mantenimiento.
- Error P: El porcentaje de error que aporta la acción proporcional (modo automático).
- Error I: El porcentaje de error que aporta la acción integral (modo automático).
- Error I: El porcentaje de error que aporta la acción derivativa (modo automático).
- %P: Porcentaje que aporta la acción proporcional al control.
- %I: Porcentaje que aporta la acción integrativa al control.
- %D: Porcentaje que aporta la acción derivativa al control.

-Indicador gráfico de nivel.

Es una representación en tiempo real que simula el comportamiento de la columna de acrílico donde se controla el nivel de agua. Cabe mencionar que esta representación se lee de arriba hacia abajo, (como si se observara la columna al revés).

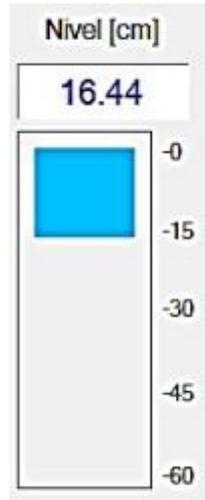


Fig. 24. Ejemplo del funcionamiento del indicador gráfico de nivel.

-Indicadores de flujo.

Estos indicadores muestran la lectura de los sensores de flujo de entrada y salida en unidades de litros/segundo.

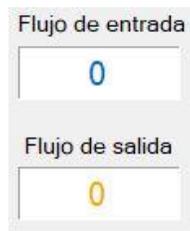


Fig. 25. Ejemplo del funcionamiento de los indicadores de flujo.

2.2.2. Modos de control.

Control Mode

Manual de flujo constante

Flujo_Sp

Automatico

Control Type

P

PI

PID

Nivel_Sp

Kp

Ki

Kd

Fig. 26. Sección "Modos de control".

2.2.2.1. Modo manual de flujo constante.

En este modo, el sistema de control se encarga de mantener la cantidad de flujo especificada por el usuario.

Para ejecutar el programa en modo manual de flujo constante se debe marcar el indicador circular mostrado en la Fig. 26(recuadro rojo). Al seleccionarlo se iluminará un indicador color rojo en la interfaz, a continuación, es momento de teclear en el recuadro correspondiente a "Flujo_Sp" la magnitud de flujo deseada en L/s y oprimir la tecla "Enter", de esta forma, dicho valor quedará registrado en la interfaz, a modo de confirmación dicho valor podrá observarse en el indicador del lado izquierdo, como se muestra en la Fig. 27.

Manual de flujo constante

Flujo_Sp

Fig. 27. Ejemplo de configuración del modo manual.

De esta forma, el sistema estará listo para ejecutar la acción de control manual, en este punto, se recomienda accionar el interruptor de seguridad (posición cerrada) y posteriormente, hacer clic en el botón Inicio de la interfaz.

2.2.2.2. Modo automático.

Para configurar el modo automático, correspondiente a los tipos de control P, PI y PID, se debe marcar el indicador circular mostrado en la Fig. 26 (recuadro azul).

The screenshot shows a control panel with the following elements:

- Automatic Mode:** A radio button labeled "Automatico" is selected.
- Control Type:** Three radio buttons are listed: "P", "PI", and "PID". None are selected.
- Nivel_Sp:** A text input field containing the value "0". To its right is a blue square indicator.
- Kp:** A text input field containing the value "0". To its right is a grey square indicator.
- Ki:** A text input field containing the value "0". To its right is a grey square indicator.
- Kd:** A text input field containing the value "0". To its right is a grey square indicator.

Fig. 28. Selección del modo de control automático.

A continuación, se elegirá el tipo de control que se desea implementar.

2.2.2.2.1. Control P.

Este modo implica una acción de control meramente proporcional, tiene como ventaja ser fiable y la capacidad de resistir las variaciones del sistema físico, sin embargo, es el modo en el que se obtienen los resultados menos precisos.

Para implementar este tipo de control es necesario seleccionar el indicador circular correspondiente en el apartado "Control type" (se encenderá un indicador amarillo junto al valor de la constante proporcional), y posteriormente indicar la altura de agua deseada (en centímetros y con valores enteros) en el recuadro correspondiente a "Nivel_Sp", finalmente, en el recuadro correspondiente a la etiqueta "Kp" se debe introducir el valor de la constante proporcional (en valores reales positivos).

The screenshot shows the control panel with the following changes:

- Control Type:** The radio button for "P" is now selected.
- Nivel_Sp:** The value remains "0".
- Kp:** The value is "0", and a yellow square indicator is now visible next to it.
- Ki and Kd:** The values remain "0" with grey square indicators.

Fig. 29. Configuración del modo de control automático P.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de K_p entre 20 y 30, obteniendo buenos resultados. Se invita al lector a experimentar con distintos valores de esta constante y observar el comportamiento del sistema.

2.2.2.2.2. Control PI.

Este modo implica una acción de control proporcional e integrativa, tiene como ventaja ser más preciso para alcanzar el valor deseado, sin embargo, si se emplean valores de la constante integral incorrectos, es posible que el tiempo de respuesta del sistema se vea muy afectado.

Para implementar este tipo de control es necesario seleccionar el indicador circular correspondiente en el apartado "Control type" (se encenderá un indicador verde junto a los valores de las constantes proporcional e integral), y posteriormente indicar la altura de agua deseada (en centímetros y con valores enteros) en el recuadro correspondiente a "Nivel_Sp", después, en el recuadro correspondiente a la etiqueta " K_p " se debe introducir el valor de la constante proporcional (en valores reales positivos) y por último, en el recuadro correspondiente a la etiqueta " K_i " se tecla el valor de la constante integral (en valores reales positivos).

The image shows a software interface for configuring a control system. At the top, there is a radio button labeled "Automatico" which is selected. Below it, under "Control Type", there are four radio buttons: "P", "PI", and "PID". The "PI" radio button is selected. To the right of these controls, there are four rows of input fields, each with a label, a text box, a colored indicator, and a small display box. The first row is for "Nivel_Sp" with a value of 25, a blue indicator, and a display of 25. The second row is for " K_p " with a value of 10, a green indicator, and a display of 10. The third row is for " K_i " with a value of 1, a green indicator, and a display of 1. The fourth row is for " K_d " with a value of 0, a grey indicator, and a display of 0.

Parameter	Value	Indicator Color	Display Value
Nivel_Sp	25	Blue	25
K_p	10	Green	10
K_i	1	Green	1
K_d	0	Grey	0

Fig. 30. Ejemplo de configuración del modo de control PI.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de K_i (alrededor de 1) obteniendo buenos resultados. Se invita al lector a experimentar con distintos valores de esta constante y observar cómo responde el sistema.

2.2.2.2.3. Control PID.

Al igual que las secciones anteriores, se requiere seleccionar en "Control type" la opción correspondiente a la etiqueta "PID", de esta forma, se activarán los recuadros para las tres constantes, proporcional, integral y derivativa. (Se iluminarán los indicadores en color rosa).

Este tipo de control es el más completo y con los mejores resultados, sin embargo, se debe tener especial cuidado con el valor de la constante derivativa debido a que puede causar inestabilidad en el sistema.

En los recuadros correspondientes a cada una de las constantes se requiere teclear los valores deseados, como se mencionó anteriormente, deben ser números reales positivos.



<input checked="" type="radio"/> Automatico				
Control Type	Nivel_Sp	25	25	
<input type="radio"/> P	Kp	10	10	
<input type="radio"/> PI	Ki	1	1	
<input checked="" type="radio"/> PID	Kd	0.01	0.01	

Fig. 31. . Ejemplo de configuración del control PID.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de K_d muy pequeños, alrededor de 0.01, obteniendo resultados favorables. Se invita al lector a experimentar con especial cautela distintos valores de esta constante y observar la respuesta del sistema.

2.3. Modo manual.

El banco de pruebas cuenta con una modalidad que permite modificar el grado de apertura de las servoválvulas por el usuario, de esta forma, se puede experimentar con las condiciones particulares de un evento y además ayuda a realizar la caracterización del banco de pruebas.

Para poner en marcha esta modalidad se deberá realizar el procedimiento de encendido, sin embargo, en lugar de ejecutar la interfaz computacional se deberá abrir desde el explorador de archivos el programa de Arduino "Manual_V2".



Fig. 32. Botones "Verificar", "Subir" y "Monitor Serie".

La interfaz de arduino cuenta con 3 botones principales en su interfaz, como se muestra en la figura anterior. El primero de ellos (Recuadro Verde) corresponde a "Verificar", al presionarlo Arduino intenta compilar el programa, de no ser posible mostrará los errores encontrados. El botón marcado en rojo equivale a la acción "Subir" y su función es compilar el programa y transmitirlo a la placa Arduino conectada al equipo vía USB. Por último, el recuadro naranja corresponde a la acción "Monitor Serie", al seleccionarlo se genera una ventana emergente en la cual se puede observar la información recabada por la placa Arduino Uno, además permite enviar comandos y de ésta forma interactuar con el programa.

A continuación, es necesario seleccionar el puerto serie que se utilizará para establecer comunicación con la placa del banco de pruebas, para ello debemos seleccionar la pestaña "Herramientas" y posteriormente en la opción "Puerto" aparecerá un desplegable de donde se seleccionará el número de puerto que haya sido asignado por la computadora a nuestro banco de pruebas. Se recomienda verificar en esta misma pestaña que en la opción "Placa" se encuentre seleccionado "Arduino/Genuino Uno".

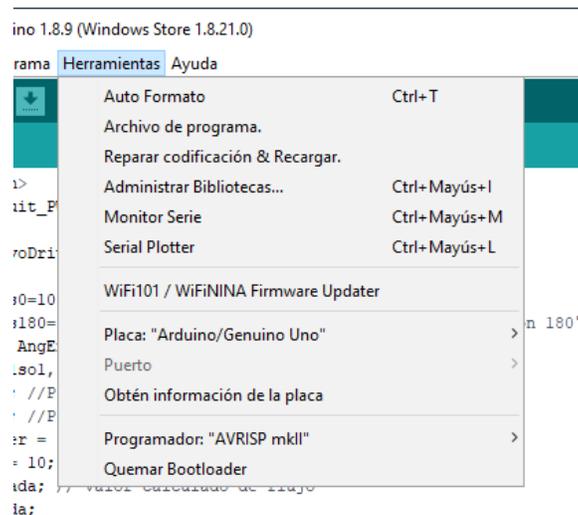


Fig. 33. Pestaña "Herramientas".

Tras haber definido el puerto, seleccione el botón "Subir" para que el programa sea cargado en el banco de pruebas, al finalizar este proceso se podrá comenzar la operación del modo manual. Se recomienda en este momento accionar el interruptor de seguridad.

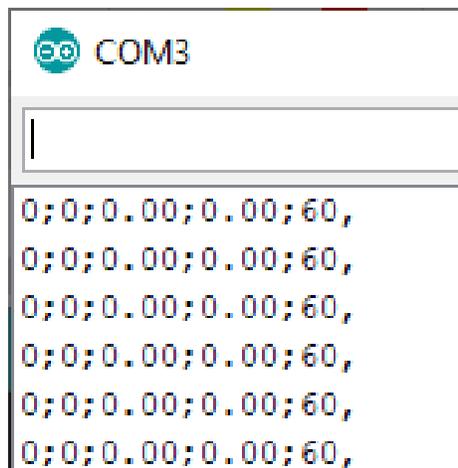
Seleccione el botón "Monitor Serie" para abrir la ventana de comunicación, en ésta se introducirán los comandos que permitirán controlar la apertura de las válvulas y además se mostrarán los datos recibidos de los sensores.

Los comandos a emplear para operar este modo son los siguientes:

- Para iniciar la comunicación teclee "I.". Cada vez que desee enviar una sentencia deberá presionar la tecla "Enter".
- Para modificar la apertura de la válvula ingrese "I.N:GG" (N corresponde al número de la válvula, 1 si es la superior, 2 si es la inferior, y G corresponde a la apertura de la válvula en grados sexagesimales, de 0 a 90.) Ej. "I.1:90"
- Para detener la recepción de datos escriba "D.".
- Para reanudar la recepción de datos introduzca "I.".

Los datos recabados por los sensores se presentarán de la siguiente forma:

(Apertura de la válvula superior); (Apertura de la válvula inferior); (Flujo de entrada); (Flujo de salida); (Altura),



```

COM3
|
0;0;0.00;0.00;60,
0;0;0.00;0.00;60,
0;0;0.00;0.00;60,
0;0;0.00;0.00;60,
0;0;0.00;0.00;60,
0;0;0.00;0.00;60,

```

Fig. 34. Formato de los datos.

Para importar los datos fácilmente en Excel realice lo siguiente:

- Abra el programa, copie los datos del monitor serie de arduino y péguelos en la primera columna del libro.
- Seleccione la pestaña "Datos".

- Localice la opción "Texto en columnas". Se abrirá una ventana emergente, oprima siguiente, en el siguiente paso selecciones las casillas "Punto y coma" y "Coma" y presione siguiente nuevamente y por último, seleccione "Finalizar".



Fig. 35. Pestaña "Datos" de Excel.

2.4. Resumen.

A continuación, se presenta una lista, a manera de resumen, de los elementos a configurar en la interfaz gráfica antes de iniciar la operación del banco. Recordatorio, antes de realizar estos pasos se recomienda verificar las conexiones básicas (sección

- 1) Ejecutar el archivo GUIServines.exe.
- 2) Escribir en el recuadro correspondiente a "Log" el nombre que se desea tengan los archivos en los que se almacenarán los datos. Oprimir el botón de inicio (Fig. 15, color morado) de esta sección.
- 3) Seleccionar de la lista desplegable el puerto serial correspondiente a la placa Arduino Uno conectada a la PC.
- 4) Seleccionar la válvula activa (entrada o salida).
- 5) Introducir el grado de apertura de la válvula pasiva.
- 6) Seleccionar el modo de control (manual o automático).

Si se selecciona flujo constante:

- 7) Introducir la magnitud del flujo deseado.
- 8) Accionar el interruptor de seguridad.
- 9) Hacer clic en el botón "Inicio" (Fig. 15, color rojo).

En cambio, se selecciona el control automático:

- 7) Seleccionar el tipo de control P, PI o PID.
- 8) Introducir el valor de altura deseado
- 9) Introducir los valores de las constantes correspondientes.
- 10) Accionar el interruptor de seguridad.
- 11) Hacer clic en el botón "Inicio" (Fig. 15, color rojo).

3. Manual del profesor.

3.1. Componentes del banco de pruebas.

Esta sección está enfocada a brindar un acercamiento técnico a los elementos y sistemas que componen el banco de pruebas, también se incluye un desglose de la interfaz computacional que controla el equipo.

3.1.1. Sistemas físicos.

Para una mejor organización se decidió dividir los componentes físicos del banco de pruebas en 4 sistemas distintos, mas adelante se entrará en detalle con cada uno de ellos. Los sistemas que componen el banco de pruebas son:

- Sistema Hidráulico: Está compuesto por la bomba hidráulica, las tuberías de alimentación, salida y bypass y las válvulas.
- Sistema de sensado y actuación: Lo componen el sensor ultrasónico, los sensores de flujo y los servomotores.
- Sistema de Control: Está implementado con una placa Arduino Uno al que se le ha acoplado una placa de montaje superficial en donde se concentra todo el cableado que recorre el banco.

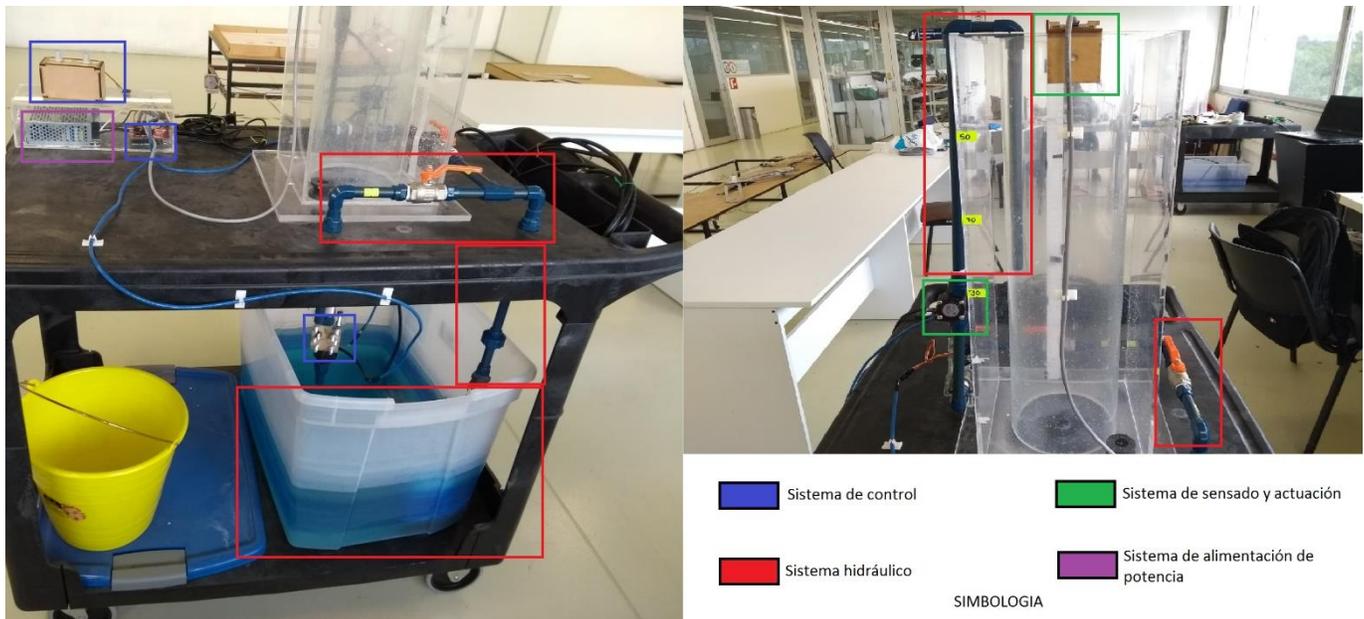


Fig. 36. Localización de elementos de cada sistema físico.

- d) Sistema de alimentación de potencia: Debido a las especificaciones de los servomotores, se requirió implementar este sistema para brindar el voltaje y la corriente óptimos, para ello se utilizó la fuente HTS-50FE-5, para recibir las señales del sistema de control y transmitir las a los servos se usó el driver PCA9685.

3.1.1.1. Sistema hidráulico.

El sistema hidráulico está compuesto por tres tuberías principales, válvulas y la bomba hidráulica. La tubería de bypass, la tubería de alimentación y la tubería de salida. Estas tuberías tienen un diámetro de 1/2".

A continuación, se muestra los componentes de este sistema en el banco de pruebas. En los recuadros, Rojo es la tubería de alimentación, Naranja es la tubería de bypass, Verde es la tubería de salida y Azul es la bomba hidráulica, en los círculos, verde es la válvula de bypass, amarillo la válvula de alimentación, morado es la servoválvula de entrada y rosa la servoválvula de salida.

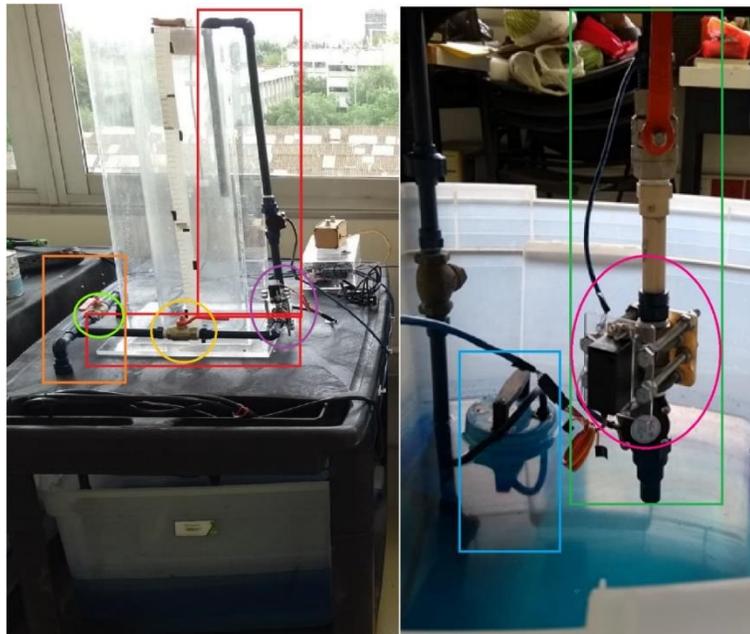


Fig. 37. Elementos del sistema hidráulico.

La tubería de bypass va conectada directamente a la bomba y en el otro extremo tiene una salida directo al tanque, la tubería de alimentación se conecta en un extremo mediante un cople a la tubería de bypass, el otro extremo se encuentra

dentro de la columna, por último, en la parte inferior se encuentra la tubería de salida.

3.1.1.2. Sistema de sensado y actuación.

Los sensores que componen este sistema son:

- Sensor de altura: Es un sensor de tipo ultrasónico que se encarga de registrar la altura de la columna de agua.
- Sensor de flujo: Sensor magnético que obtiene el valor del caudal que recorre la tubería de alimentación y la de salida.

Los únicos actuadores con los que cuenta el banco de pruebas son los servomotores que forman parte de los conjuntos llamados "servoválvulas".



Fig. 38. Vista de la servoválvula y el sensor de flujo de entrada.

3.1.1.3. Sistema de control.

Este compuesto por el Arduino uno y la placa de montaje superficial. Se encuentra ubicado dentro del gabinete de plástico.

3.1.1.4. Sistema de alimentación de potencia.

Este sistema está compuesto por una fuente de voltaje que proporciona la energía eléctrica necesaria para el correcto funcionamiento de los servomotores que abren o cierran las válvulas. El driver PCA9685 sirve como puente entre el sistema de control, el sistema de alimentación de potencia y el servomotor.



Fig. 39. Cableado del sistema de alimentación.

NOTA: La etapa de potencia cuenta con un interruptor de seguridad, se recomienda mantener este interruptor en su posición abierta (apagado) mientras no se esté utilizando el programa de control del banco de pruebas, acciónelo únicamente cuando se desee llenar la columna de acrílico.



Fig. 40. Interruptor de seguridad acoplado al gabinete.

3.1.2. Interfaz de usuario.

A continuación, se muestra la ventana de la interfaz gráfica.

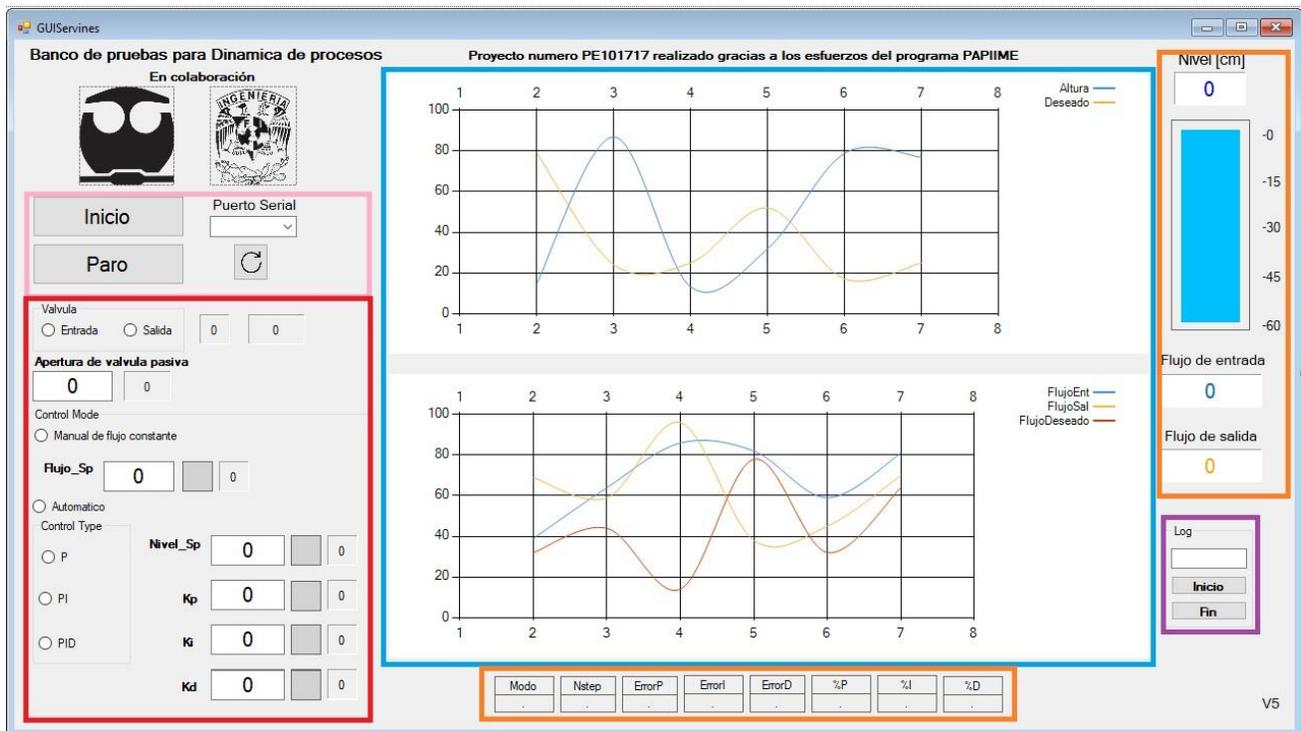


Fig. 41. División de la interfaz por secciones.

En color Rojo se señala la zona de selección de modalidad de control, en naranja los indicadores, en azul los gráficos, en rosa la botonería y en morado el registro de usuario.

3.1.2.1. Modalidades de control.

The screenshot shows a control interface with two main sections. The top section, titled 'Control Mode', has a red border and contains a radio button for 'Manual de flujo constante' which is selected. Below it is a 'Flujo_Sp' input field with the value '0'. The bottom section, titled 'Automatico', has a blue border and contains a radio button for 'Automatico' which is also selected. Underneath is a 'Control Type' dropdown menu with options 'P', 'PI', and 'PID'. To the right of the dropdown are four input fields for 'Nivel_Sp', 'Kp', 'Ki', and 'Kd', each with the value '0'.

Fig. 42. Ampliación del apartado "Control Mode".

3.1.2.1.1. Modo de flujo constante.

En este modo, el sistema de control se encarga de mantener la magnitud de flujo especificada por el usuario. Se aplica un esquema de control PI en el que la variable controlada es el valor del caudal que recorre la tubería seleccionada, puede ser la de alimentación (entrada) o la de salida. .

Para ejecutar el programa en modo de flujo constante se debe marcar el indicador circular correspondiente. Al seleccionarlo se iluminará un indicador color rojo en la interfaz, a continuación, teclear en el recuadro correspondiente a "Flujo_Sp" la magnitud de flujo deseada en L/s y oprimir la tecla "Enter", para que el valor quede registrado en la interfaz.

This screenshot shows the 'Manual de flujo constante' mode selected, indicated by a red circle around the radio button. The 'Flujo_Sp' input field now contains the value '10'. A red square indicator is illuminated to the right of the input field, signifying that the mode is active.

Fig. 43. Ampliación del modo de flujo constante.

3.1.2.1.2. Modo automático.

Para configurar el modo automático, correspondiente a los tipos de control P, PI y PID, se debe marcar en la interfaz el indicador circular correspondiente.

The screenshot shows a control interface with the following elements:

- A radio button labeled "Automatico" is selected.
- Under "Control Type", there are three unselected radio buttons: "P", "PI", and "PID".
- There are four input fields for control parameters: "Nivel_Sp", "Kp", "Ki", and "Kd". Each field contains the value "0".
- Next to each input field is a small square indicator. The indicator for "Nivel_Sp" is blue, while the others are grey.

Fig. 44. Sección de control automático.

A continuación, se elegirá el tipo de control que se desea implementar.

3.1.2.1.2.1. Control P.

Este modo implica esquema de control de lazo cerrado con acción meramente proporcional.

En el apartado "Control type" seleccione el indicador circular rotulado como "P" para activar este modo (se encenderá un indicador amarillo junto al valor de la constante proporcional), posteriormente se debe indicar la altura de agua deseada (en centímetros y con valores enteros) en el recuadro correspondiente a "Nivel_Sp", finalmente, en el recuadro correspondiente a la etiqueta "Kp" se debe introducir el valor de la constante proporcional (en valores reales positivos).

The screenshot shows the control interface with the following changes:

- The "Automatico" radio button is still selected.
- The "P" radio button under "Control Type" is now selected.
- The "Nivel_Sp" field remains at 0, with the blue indicator still present.
- The "Kp" field is now at 0, and a yellow square indicator is visible next to it.
- The "Ki" and "Kd" fields remain at 0 with grey indicators.

Fig. 45. Configuración de control P.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de K_p entre 20 y 30, obteniendo buenos resultados.

3.1.2.1.2.2. Control PI.

Este modo implica un esquema de control de lazo cerrado con acción de proporcional e integrativa.

Para activar este tipo de control seleccione el indicador circular correspondiente en el apartado "Control type" (se encenderá un indicador verde junto a los valores de las constantes proporcional e integral), y posteriormente, indique la altura de agua deseada, el valor de K_p y K_i en los recuadros correspondientes.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de K_i (alrededor de 1) obteniendo buenos resultados.

<input checked="" type="radio"/> Automatico			
Control Type	Nivel_Sp	25	25
<input type="radio"/> P			
<input checked="" type="radio"/> PI	Kp	10	10
<input type="radio"/> PID	Ki	1	1
	Kd	0	0

Fig. 46. Configuración de control PI.

3.1.2.1.2.3. Control PID.

Esta modalidad implica un control de lazo cerrado PID paralelo, al igual que las secciones anteriores, se requiere seleccionar en "Control type" la opción correspondiente a la etiqueta "PID", se activarán los recuadros para las tres constantes, proporcional, integral y derivativa (Se iluminarán los indicadores en color rosa). Indique los valores correspondientes.

Fig. 47. . Ejemplo de configuración del control PID.

NOTA: Durante el desarrollo del banco de pruebas se emplearon valores de Kd muy pequeños, alrededor de 0.01, obteniendo resultados favorables.

3.1.2.2. Herramientas de recolección de datos

3.1.2.2.1. Registro de usuario.

Esta sección de la interfaz permite registrar todos los datos obtenidos por los sensores de flujo y de nivel durante el tiempo en que se utilizó el banco de pruebas, generando archivos de texto con los datos antes mencionados. Para hacer uso de esta función, únicamente se requiere introducir en el recuadro el nombre que se desea asignar al archivo generado durante la sesión y oprimir el botón "inicio" (el sistema emitirá un cuadro de diálogo con la leyenda "Empieza log"). Si en algún momento se desea dejar de almacenar datos, se debe seleccionar el botón "Fin" (el sistema notificará al usuario a través de un cuadro de diálogo con la leyenda "Termina log"). Se recomienda asignar nombres que permitan identificar fácilmente del archivo correspondiente a cada evento, no repita nombres ya que podría perder información.

Fig. 48. Sección de "Log".

3.1.2.2.2. Indicadores.

El banco de pruebas cuenta con dos grupos de indicadores, el primero incluye el gráfico de altura y los valores de flujo de entrada, flujo de salida y apertura de válvulas de entrada y salida, el segundo incluye algunas variables de interés para el control.

-Indicadores de valores de control.

Modo	Nstep	ErrorP	ErrorI	ErrorD	%P	%I	%D
.

Fig. 49. Conjunto de indicadores de control.

- i) Modo: Puede adquirir dos valores, "1" si se trata del modo manual y "2" si se ejecuta el modo automático.
- j) Nstep: Indicador reservado para actividades de mantenimiento.
- k) Error P: El porcentaje de error que aporta la acción proporcional (modo automático).
- l) Error I: El porcentaje de error que aporta la acción integrativa (modo automático).
- m) Error I: El porcentaje de error que aporta la acción derivativa (modo automático).
- n) %P: Porcentaje que aporta la acción proporcional al control.
- o) %I: Porcentaje que aporta la acción integrativa al control.
- p) %D: Porcentaje que aporta la acción derivativa al control.

-Indicador gráfico de nivel.

Es una representación en tiempo real que simula el comportamiento de la columna de acrílico donde se controla el nivel de agua. Cabe mencionar que esta representación se lee de arriba hacia abajo, (como si se observara la columna al revés).

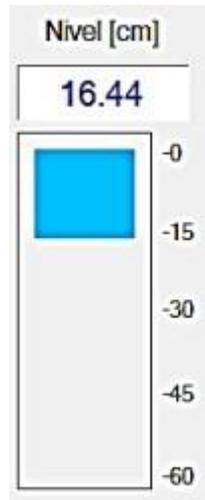


Fig. 50. Indicador gráfico de nivel.

-Indicadores de flujo.

Estos indicadores muestran la lectura de los sensores de flujo de entrada y salida en unidades de litros/segundo.



Fig. 51. Apariencia de los indicadores de flujos de entrada y salida.

3.1.2.2.3. Gráficos.

-Gráfica de altura vs tiempo.

Al hacer clic en el botón de inicio, el programa comienza a registrar automáticamente en esta grafica los datos de altura obtenidos por el sensor, cabe mencionar que esta gráfica es dinámica, por lo que cuando ocupa toda el área comienza a recorrerse, ajustando la escala según los valores que se tengan en todo momento. Si se ejecuta en modo automático, la gráfica mostrará en todo momento el valor de altura deseado.

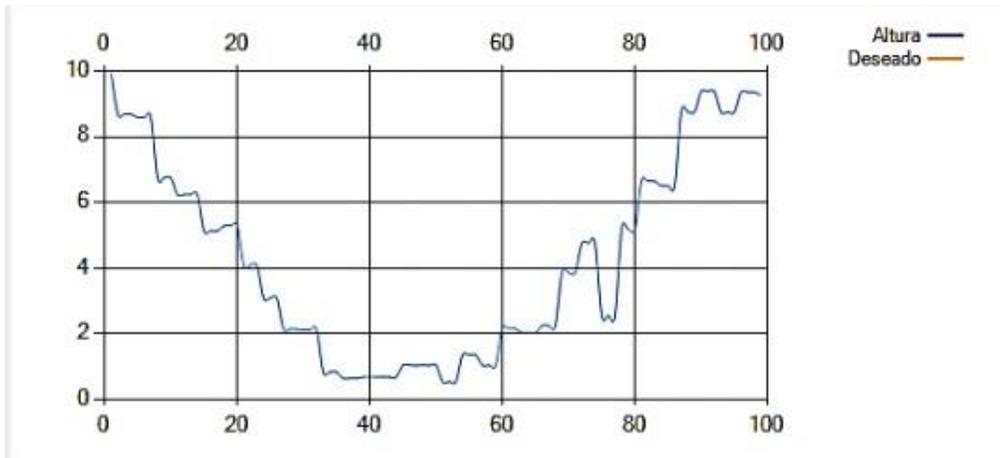


Fig. 52. Ejemplo de gráfico de altura.

-Gráfica de flujo vs tiempo.

Al igual que en el apartado anterior, si se hace clic en el botón de inicio, el programa comienza a registrar automáticamente los datos de flujo reportados por los sensores de entrada y salida, el comportamiento de esta gráfica también es dinámico. Si se ejecuta en modo manual, la gráfica mostrará en todo momento el valor de flujo deseado.

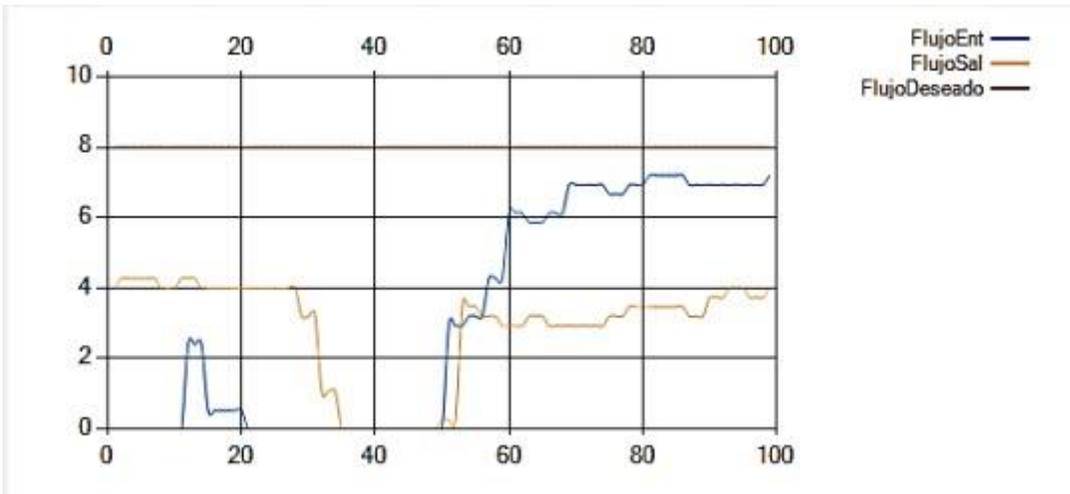


Fig. 53. Ejemplo de gráfico de flujo.

3.1.2.3. Botonería.

El botón de inicio comienza la ejecución de las secuencias de control, sin embargo, antes de presionarlo es necesario configurar las distintas preferencias que se desean aplicar en el funcionamiento del banco de pruebas. El botón de paro cierra la comunicación con el sistema de control y automáticamente cierra la interfaz. La

interfaz también puede cerrarse haciendo clic en el botón correspondiente de la barra de título de la ventana.

-Selección del puerto serial.

Para el funcionamiento de la interfaz es de vital importancia seleccionar en el cuadro desplegable el puerto serial asignado por la PC a la placa Arduino Uno.

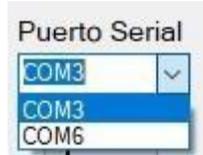


Fig. 54. Desplegado de selección del puerto serial.

Dentro de esta sección se incluye también el botón "Reset", esta opción reinicia todos los elementos de la interfaz, por lo que regresan a su estado inicial.

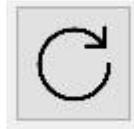


Fig. 55. Botón de reinicio.

-Selección de la válvula de control.

El banco de pruebas cuenta con dos servoválvulas. La acción de control se realiza por medio de la regulación de una de estas válvulas, a la cual se le denomina "válvula activa". La válvula restante tendrá una apertura fija definida por el usuario, por lo que se le denomina "válvula pasiva".

En la zona mostrada en la figura de abajo, el usuario determina cuál de las dos válvulas fungirá como "activa", marcando el círculo que corresponde a la válvula deseada.



Fig. 56. Definición de la válvula activa.

Cabe mencionar que en los recuadros del lado derecho (imagen de arriba) se muestran algunas variables de control para facilitar la rápida identificación del modo de trabajo, en el primero (de izquierda a derecha) se asigna un "1" cuando se selecciona la válvula de entrada o un "2" cuando se elige la de salida, en el segundo cuadro se visualiza la apertura de la válvula seleccionada en grados.

Debajo de la sección “Válvula” se encuentra la opción “Apertura de válvula pasiva” cuya función es definir la magnitud fija, en grados sexagesimales, que se abrirá esta válvula. El valor ingresado debe ser un número entero, de lo contrario, el sistema enviará un mensaje de error.

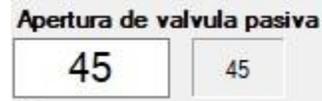


Fig. 57. Establecimiento de apertura constante en la válvula pasiva.

3.1.3. Modo manual.

El banco de pruebas cuenta con una modalidad que permite modificar el grado de apertura de las servoválvulas por el usuario, de esta forma, se puede experimentar con las condiciones particulares de un evento y además ayuda a realizar la caracterización del banco de pruebas.

Para poner en marcha esta modalidad se deberá realizar el procedimiento de encendido, sin embargo, en lugar de ejecutar la interfaz computacional se deberá abrir desde el explorador de archivos el programa de Arduino “Manual_V2”. Tras realizar esto, se mostrará una ventana similar a la mostrada en la siguiente figura.

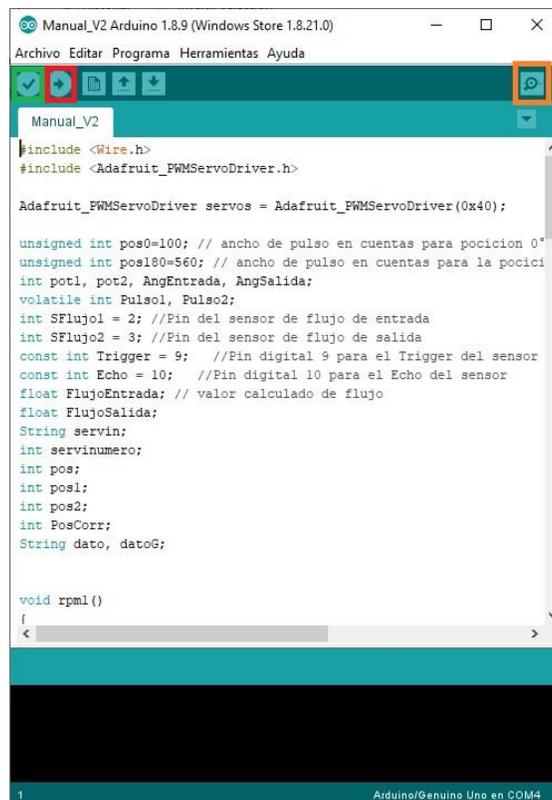


Fig. 58. Ejemplo de ventana del programa Arduino.

A continuación, es necesario seleccionar el puerto serie que se utilizará para establecer comunicación con la placa del banco de pruebas, para ello debemos seleccionar la pestaña “Herramientas” y posteriormente en la opción “Puerto” aparecerá un desplegable de donde se seleccionará el número de puerto que haya sido asignado por la computadora a nuestro banco de pruebas. Se recomienda verificar en esta misma pestaña que en la opción “Placa” se encuentre seleccionado “Arduino/Genuino Uno”.

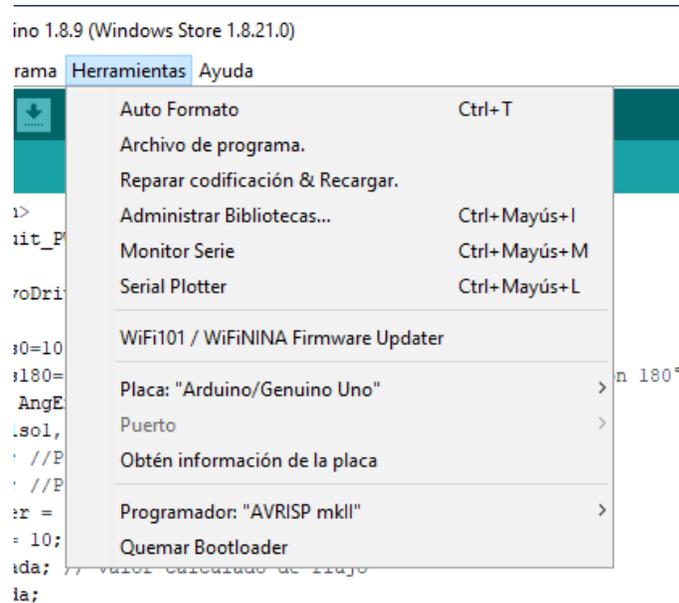


Fig. 59. Elementos que componen la pestaña “Herramientas”.

Tras haber definido el puerto, seleccione el botón “Subir” para que el programa sea cargado en el banco de pruebas, al finalizar este proceso se podrá comenzar la operación del modo manual. Se recomienda en este momento accionar el interruptor de seguridad.

Seleccione el botón “Monitor Serie” para abrir la ventana de comunicación, en ésta se introducirán los comandos que permitirán controlar la apertura de las válvulas y además se mostrarán los datos recibidos de los sensores.

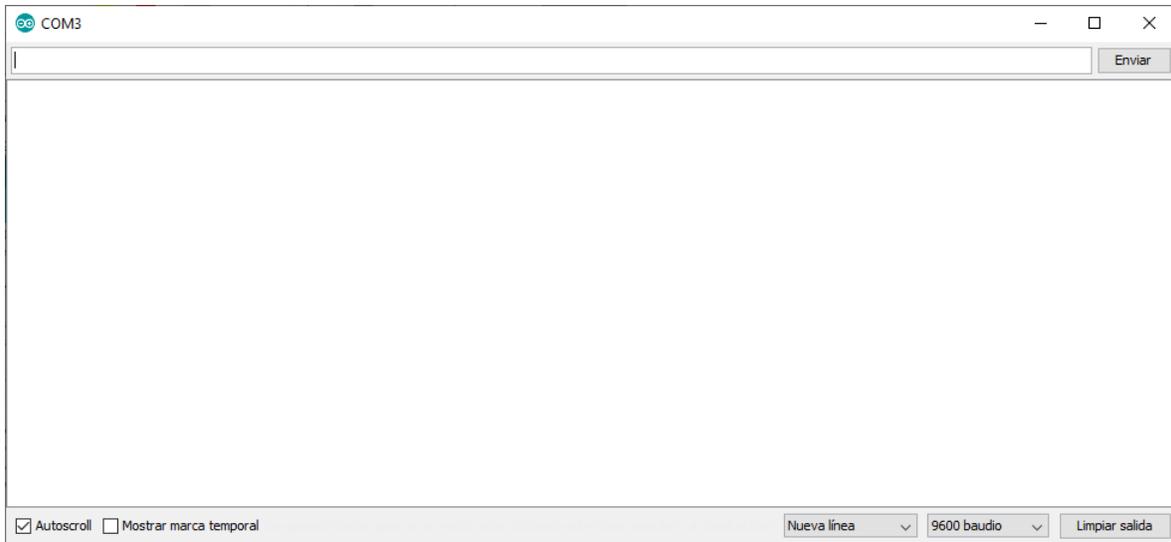


Fig. 60. Ventana del monitor serie.

Los comandos a emplear para operar este modo son los siguientes:

- Para iniciar la comunicación teclee "I.". Cada vez que desee enviar una sentencia deberá presionar la tecla "Enter".
- Para modificar la apertura de la válvula ingrese "I.N:GG" (N corresponde al número de la válvula, 1 si es la superior, 2 si es la inferior, y G corresponde a la apertura de la válvula en grados sexagesimales, de 0 a 90.) Ej. "I.1:90"
- Para detener la recepción de datos escriba "D."
- Para reanudar la recepción de datos introduzca "I."

Los datos recabados por los sensores se presentarán de la siguiente forma:

AA;BB;CC.CC;DD.DD;EE.EE,

Donde A, corresponde a la apertura de la válvula superior, B a la inferior, C es el valor del flujo en litros por minuto medido a la entrada, D corresponde al valor del flujo a la salida, por último, E corresponde al valor de la altura en centímetros. Este formato ha sido diseñado para facilitar el análisis de los datos empleando Office Excel.

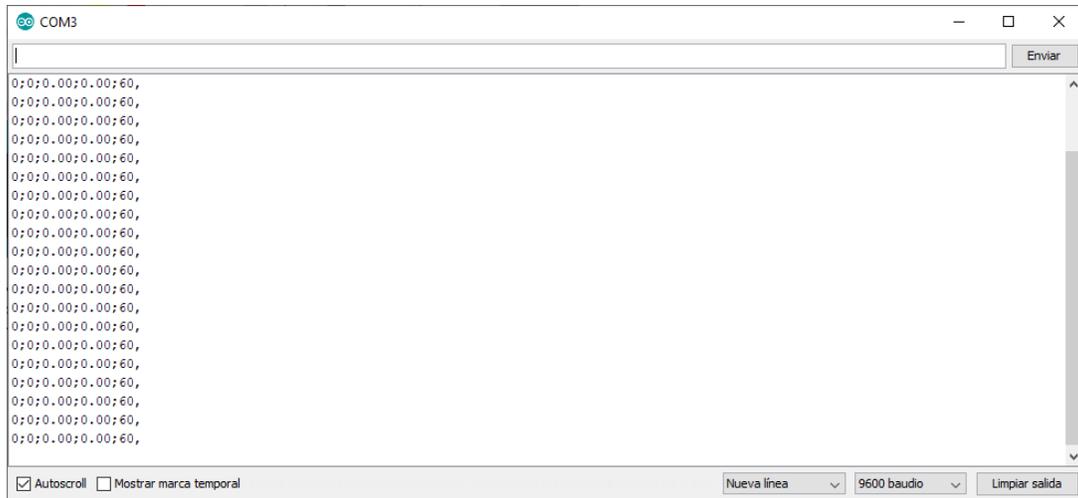


Fig. 61. Ejemplo de recolección de datos en el monitor serie.

Para importar los datos fácilmente en Excel realice lo siguiente:

- Abra el programa, copie los datos del monitor serie de arduino y péguelos en la primera columna del libro.
- Seleccione la pestaña "Datos".
- Localice la opción "Texto en columnas". Se abrirá una ventana emergente, oprima siguiente, en el siguiente paso selecciones las casillas "Punto y coma" y "Coma" y presione siguiente nuevamente y por último, seleccione "Finalizar".

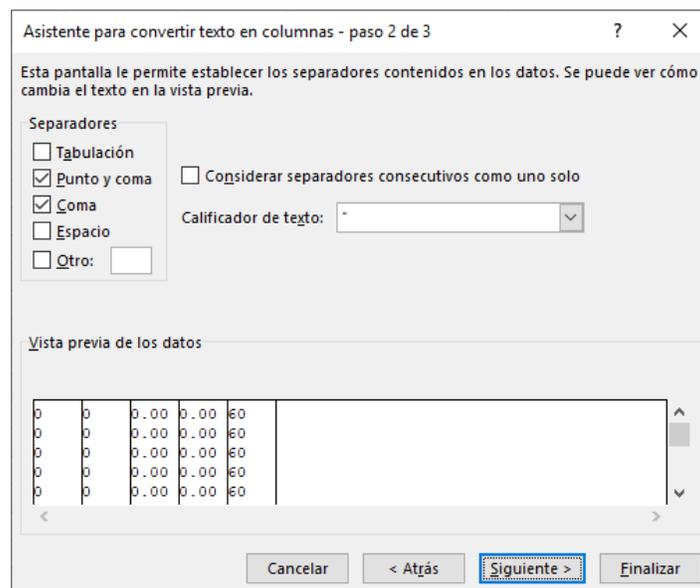


Fig. 62. Ventana "Texto en columnas", paso 2: definición de separadores.

3.2. Conexiones.

Esta sección está enfocada en establecer una memoria escrita de las conexiones realizadas en la instrumentación del banco de pruebas, con la finalidad de apoyar las labores de mantenimiento, solución de problemas y sentar un precedente para futuras iteraciones relacionadas con este proyecto.

3.2.1. Conexión del sensor de nivel.

La altura de la columna de agua se registra por medio de un sensor de tipo ultrasónico denominado "HC-SR04"



Fig. 63. Vista frontal del sensor HC-SR04.

Este sensor consta de dos elementos básicos, un emisor y un receptor, y su principio de funcionamiento se basa en la emisión de ondas de ultrasonido, dichas ondas se propagan por el espacio hasta que topan con un obstáculo, al producirse esta interferencia las ondas rebotan en dirección contraria (regresando hacia el sensor),

Desafortunadamente el sensor no tiene la capacidad de brindar el valor de la distancia a la que se encuentra el objeto detectado, en cambio, envía un pulso eléctrico cuya duración es el tiempo que tarda la señal en ir y venir, de tal forma, que la distancia con el objeto se determina en base a este tiempo y a la velocidad del sonido (aprox. 340 m/s). Cabe mencionar que dicho tiempo implica dos recorridos, es decir, la señal recorre la distancia del sensor al objeto una vez de ida y otra más de regreso, por lo que es necesario dividirlo entre 2.

$$d = Vt = \frac{\left(340 \left[\frac{m}{s}\right]\right) (t[s])}{2}$$

Como se mencionó anteriormente, el sensor únicamente envía una señal eléctrica con cierta duración de tiempo, para interpretar esta información se utiliza la placa Arduino Uno.

El sensor cuenta con cuatro pines de conexión:

- 1) Vcc: Voltaje de alimentación (5V CD).
- 2) Trig: Señal que controla la emisión de ondas sonoras.
- 3) Echo: Señal que emite el impulso eléctrico. (Esta es la señal que se utiliza para determinar el tiempo que tardan las ondas sonoras en regresar al sensor)
- 4) Gnd: Tierra.

La conexión con el Arduino uno se realiza de la siguiente forma:

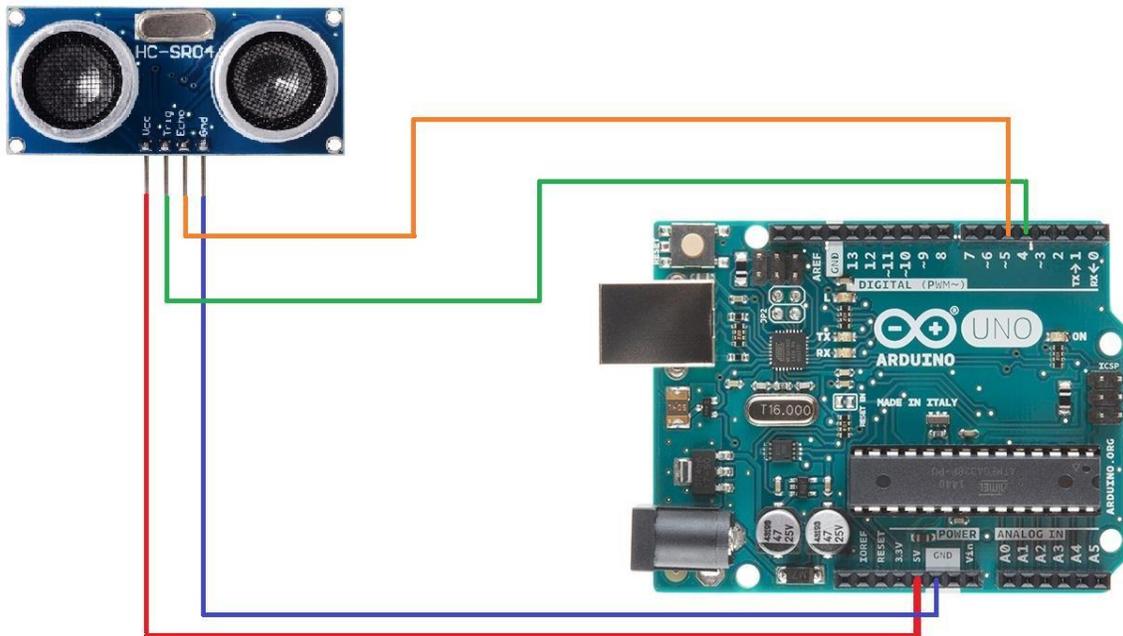


Fig. 64. Conexión del sensor HC-SR04 a la placa Arduino Uno.

NOTA: El diagrama de conexiones de la Fig. 64 toma como referencia la forma en que fueron establecidos los pines en el programa "HIPERControl_PI_Matlab.ino". En la instrumentación del banco se implementó una placa de montaje superficial que facilita drásticamente la conexión de todos los elementos al Arduino Uno. Mas adelante se explicará el diseño y conexiones de dicha placa.

3.2.2. Sensores de flujo.

El caudal de las tuberías de entrada y salida de agua se mide con los sensores "YFS201".



Fig. 65. Sensor "YF-S201"

Este sensor funciona en base a un rotor con aspas, ubicado dentro de la cámara, que gira cuando pasa un flujo de agua a través de él, en función de las variaciones del caudal, la velocidad del rotor se altera. Cada vez que el rotor da una vuelta completa, genera un pulso eléctrico, por lo que la señal de salida de este sensor es un tren de pulsos eléctricos con frecuencia variable.

El caudal se obtiene a partir de la frecuencia del tren de pulsos aplicando la siguiente ecuación, cabe mencionar que el valor de la constante K ha sido proporcionado por el fabricante.

$$Q = \frac{f}{K}; \quad K = 7.5$$

La placa Arduino uno, a través de una serie de instrucciones, obtiene la frecuencia del tren de pulsos enviado por el sensor de flujo y realiza la conversión para obtener el valor del caudal de agua en Litros/segundo.

Este sensor consta de 3 pines de conexión:

- 1) Amarillo: Tren de pulsos (esta es la señal que se utiliza para calcular el valor del flujo volumétrico de agua).
- 2) Negro: Tierra.
- 3) Rojo: Alimentación (5V CD).

En la Fig. 66 se muestra un esquemático de la conexión de los sensores de flujo a la entrada y la salida de agua.

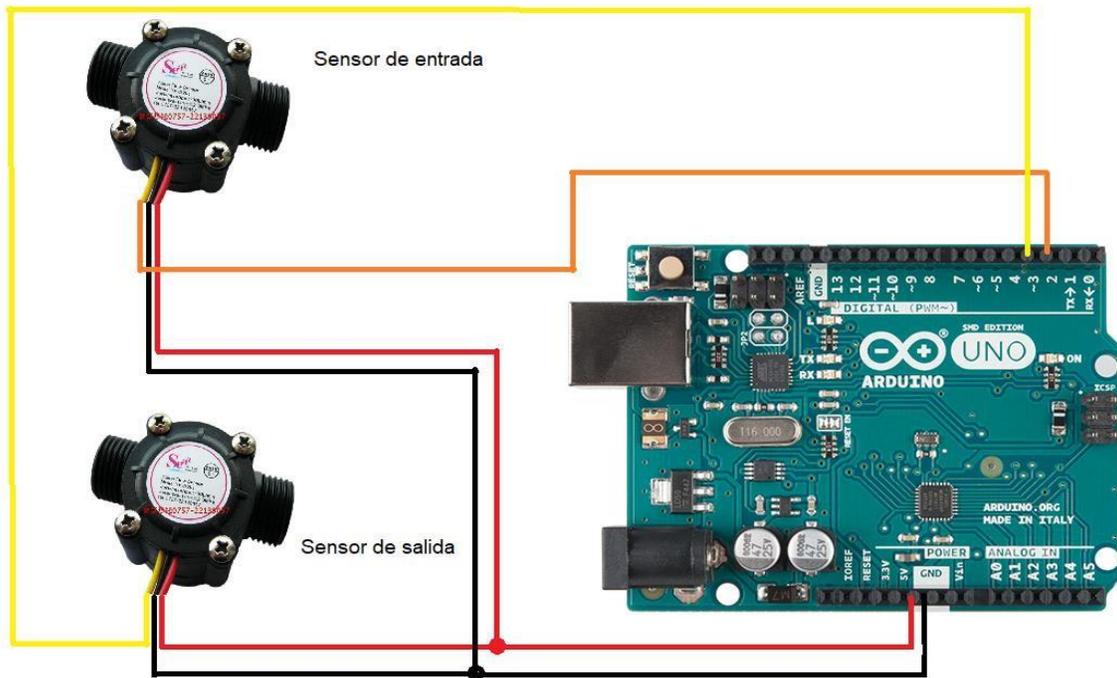


Fig. 66.. Conexiones de los sensores de flujo. Los círculos de representan nodos (conexiones entre dos cables).

NOTA: El diagrama de conexiones de la Fig. 66 toma como referencia la forma en que fueron establecidos los pines en el programa "HIPERControl_PI_Matlab.ino". En la instrumentación del banco se implementó una placa de montaje superficial que facilita drásticamente la conexión de todos los elementos al Arduino Uno. Mas adelante se explicará el diseño y conexiones de dicha placa.

3.2.3. Servomotores.

El control de los flujos de entrada y salida de agua se realiza por medio de un dispositivo denominado "Servoválvula", este dispositivo es la solución diseñada por la facultad de ingeniería para hacer posible el control automático del banco de pruebas.

El modelo de servomotor empleado es el HD-1501MG cuyo par máximo es de 15.5 kg.cm recibiendo una alimentación de 4.8 [V].

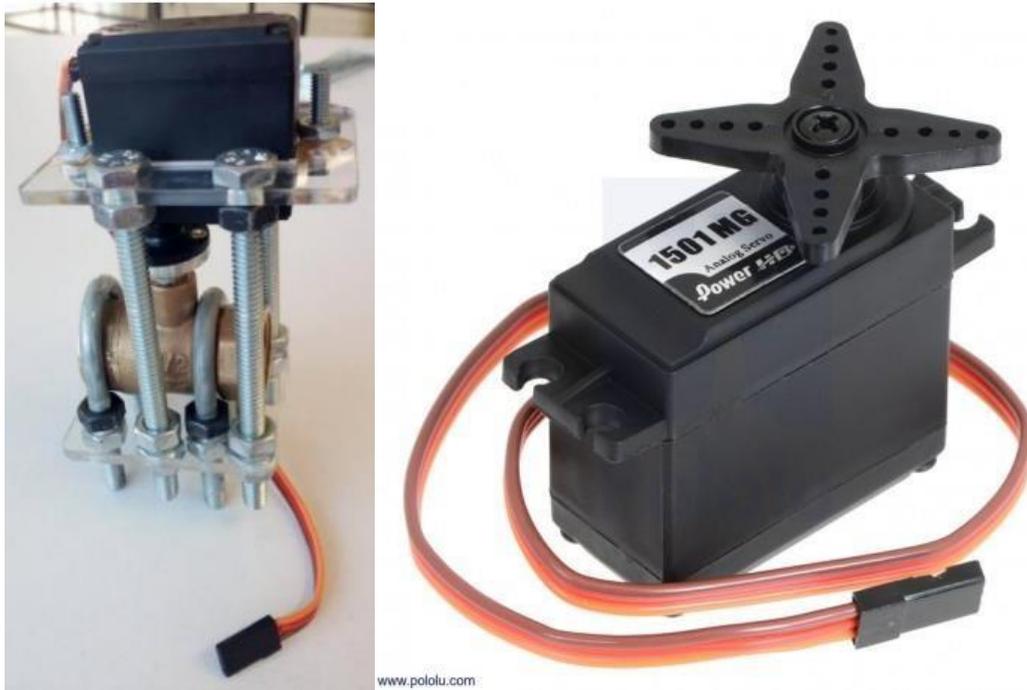


Fig. 67. Vista lateral de la servoválvula y el servomotor HG-1501MG.

Para la instrumentación del banco de pruebas se emplearon dos servoválvulas, es decir, se requirió controlar dos servomotores. Cabe mencionar que, por su elevado par, estos servomotores requieren una fuente de alimentación capaz de soportar la potencia que demandan y los picos de corriente de hasta 2.5 [A], desafortunadamente, la placa Arduino Uno no es capaz de satisfacer tales requerimientos, por tal motivo que se implementó la fuente de voltaje HTS-50FE-5 de 5[V], acoplada al interruptor de seguridad mencionado en secciones anteriores, la función específica de este interruptor es cortar el suministro de energía a los servomotores para evitar que puedan dañarse.

Para facilitar el control y alimentación de estos servomotores se empleó el circuito PCA9685, que, además de simplificar las conexiones con la placa Arduino Uno, permite controlar hasta 16 servos independientes, cabe mencionar que este circuito se encarga también de regular los valores de corriente y voltaje necesarios para el correcto funcionamiento de los servos, por lo que es aquí donde se conecta la fuente de voltaje.

Finalmente, queda mencionar que los servomotores se controlan a través de PWM, que significa, modulación por ancho de pulsos, en pocas palabras, el circuito emite un tren de pulsos con ancho variable que el servomotor traduce en un movimiento de su eje.

A continuación, se presenta un esquemático de las conexiones entre la fuente HTS50FE-5, el circuito PCA9685, la placa Arduino Uno y los servomotores.

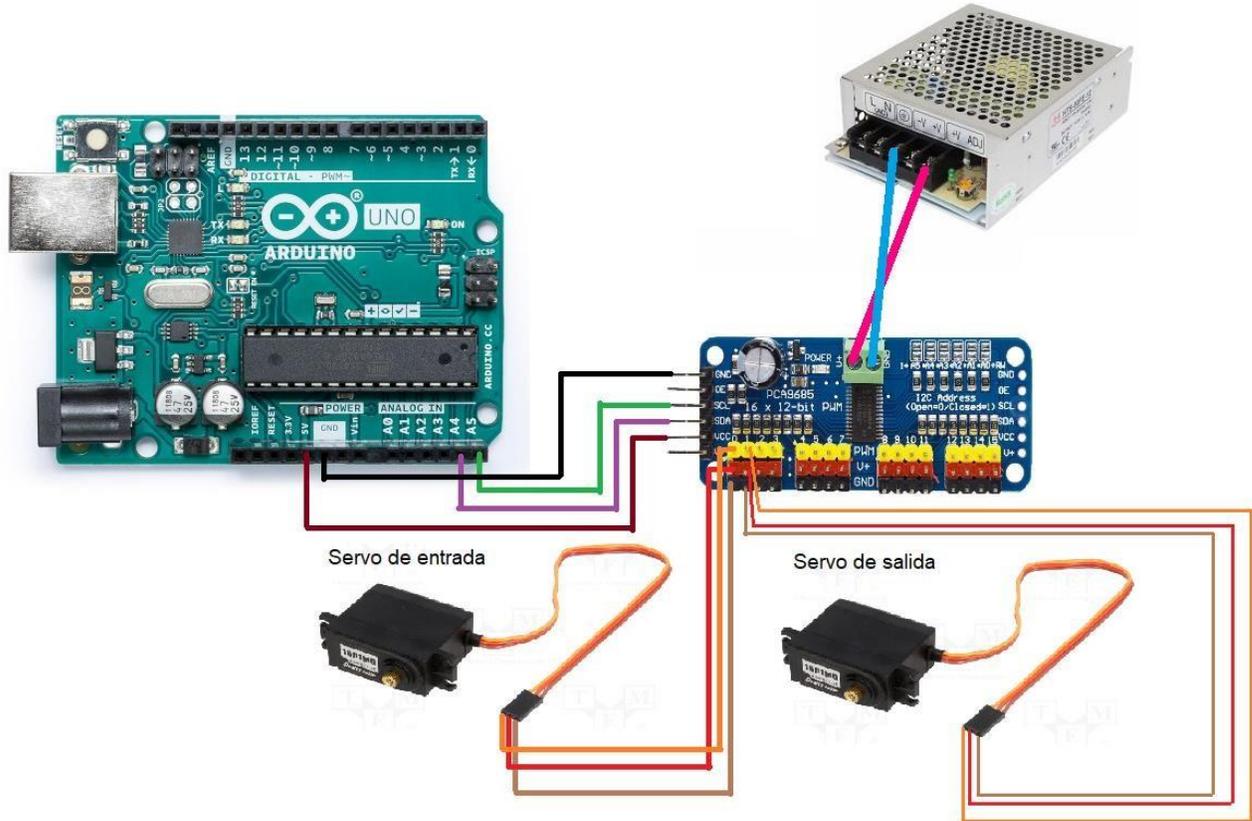


Fig. 68. Diagrama de conexiones para el control de los servomotores.

3.2.4. Placa de montaje superficial.

Como podrá haberse dado cuenta, en la placa Arduino confluyen varios dispositivos (el sensor ultrasónico, los dos sensores de flujo y el circuito PCA9685), y muchos de ellos requieren conectarse a las mismas terminales, en especial las terminales "5V" y "GND" presentan mayor saturación, es por ello que, con el objetivo de facilitar estas conexiones, se diseñó una placa de montaje superficial que cuenta con pistas (una especie de conexiones planas) que dirigen las señales provenientes de cada pin proveniente de un dispositivo al conector correspondiente del Arduino uno.

Esta placa cuenta en la parte inferior con pines para todas las terminales del Arduino uno y únicamente se coloca encima de éste, en la parte superior posee terminales para conectar los grupos de cables de cada dispositivo que compone el banco, en la Fig. 69 se muestra su diseño y las terminales que corresponden a cada elemento.

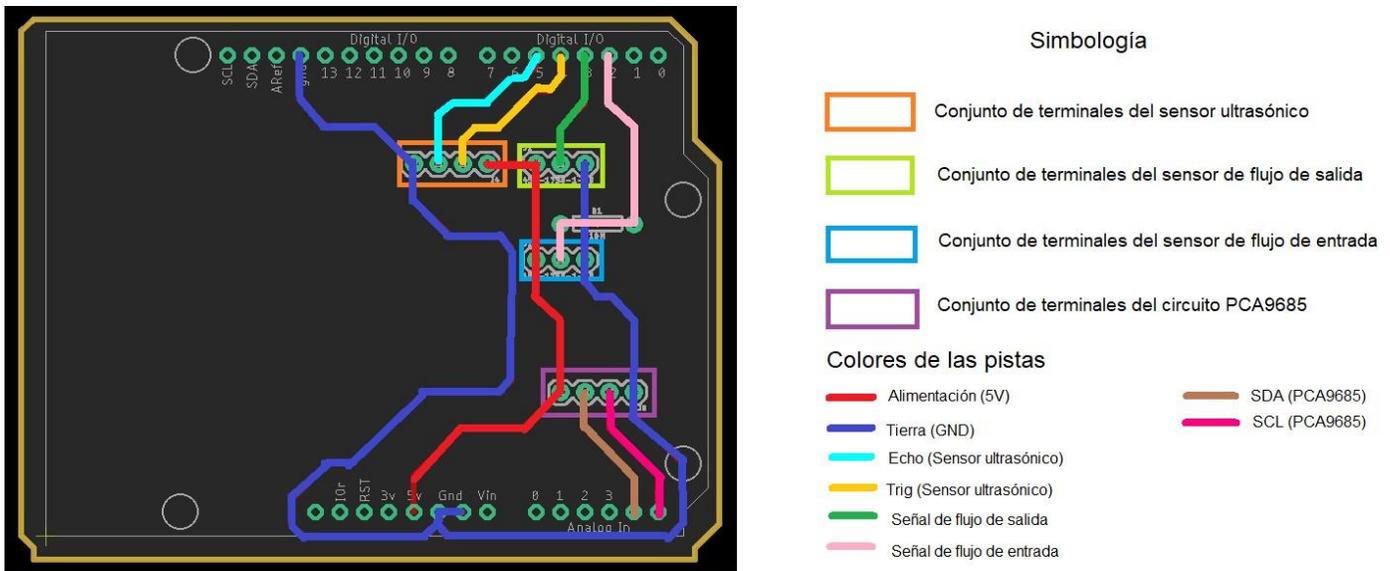


Fig. 69. Diseño de la placa de montaje superficial, los rectángulos corresponden a los conjuntos de terminales para conexión de dispositivos, los colores de las pistas son únicamente ilustrativos (no confundir con el borde de la placa).

3.2.5. Realización de las conexiones físicas.

Para las conexiones se emplearon cables con terminales tipo "Dupont", conocidos coloquialmente como "Jumpers", a continuación, se presentan algunas recomendaciones para asignar los colores de los jumpers dependiendo de cada tipo de conexión:

- Terminales de tierra (GND), se recomienda el azul, café o negro
- Terminales de alimentación (5V), se recomienda el color rojo, amarillo o blanco.
- Terminales dedicadas para señales eléctricas (información), se recomienda naranja, verde, morado, gris, etc.
- En general, se recomienda no repetir colores entre distintas conexiones de un mismo dispositivo.



Fig. 70. Ejemplos de jumpers.

3.3. Puesta en marcha.

3.3.1. Conexiones básicas.

Los elementos que requieren conexión son los siguientes, se recomienda respetar este orden:

1. Conecte el cable USB a la computadora.
2. Conecte el cable de alimentación del sistema de potencia a una toma convencional.
3. Conectar el cable de alimentación de la bomba hidráulica a una toma convencional.

Antes de realizar el último paso revise los procedimientos de seguridad.

3.3.2. Procedimientos de seguridad.

- a) Para la operación normal del banco de pruebas se recomienda abrir completamente la válvula ubicada en la tubería de alimentación y cerrar la válvula de bypass, ésta última puede abrirse parcial o totalmente para reducir la velocidad de llenado de la columna.
- b) Si se desea hacer una pausa en la operación del banco sin desconectar la bomba se debe cerrar totalmente la válvula de alimentación e inmediatamente abrir completamente la válvula de bypass, de esta forma el fluido permanecerá circulando únicamente a través de la bomba y la tubería de bypass. Para reiniciar la operación realice el procedimiento a).
- c) Para evitar daños en la bomba o en las tuberías, nunca mantenga ambas válvulas cerradas mientras la bomba se encuentra energizada.
- d) En caso de que la columna se desborde realice el procedimiento b). La columna cuenta con dos secciones, si se desborda la sección interior, la exterior comenzará a captar el agua y la devolverá al tanque de alimentación, para evitar problemas realice el procedimiento al desbordarse la columna interior.

3.3.3. Inicio de la operación.

Realice el procedimiento b), conecte la bomba hidráulica, presione el interruptor de seguridad y ejecute la interfaz y configúrela, finalmente seleccione el botón "iniciar" e inmediatamente realice el procedimiento a).

3.3.4. Fin de la operación.

Realice el procedimiento b) y seleccione el botón "Paro" de la interfaz, esta se cerrará, desactive el interruptor de seguridad y por ultimo desconecte todo y espere a que la columna se vacíe.

3.4. Solución de problemas.

En este capítulo se enlistan algunos de los problemas más comunes que pueden suscitarse al operar el banco de pruebas y sus posibles soluciones.

3.4.1. La PC no detecta el Arduino al conectar el cable.

Intente lo siguiente:

- Verifique que el cable se encuentre conectado a la placa Arduino uno, en caso de que el Arduino esté conectado la placa encenderá un led color verde (se encuentra dentro del gabinete de acrílico, ver Fig. 1 recuadro naranja).
- Intente conectando el cable a otro puerto USB de la computadora.
- Si detecta que el cable está dañado, sustitúyalo.

Si lo anterior no funciona, pero el Arduino enciende el led:

- Es posible que necesite instalar los drivers manualmente, visite (<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>) para descargar la versión más reciente del IDE Arduino y posteriormente realice la instalación de éste, en un momento de la instalación aparecerá un cuadro de diálogo solicitando si desea instalar el software controlador de dispositivo, acción que deberá "Aceptar".
- También puede actualizar manualmente el software de controlador, abra el Administrador de dispositivos y despliegue la lista "Puertos COM y LPT" o en su defecto, la lista "Otros dispositivos", en ellas encontrará la opción "Arduino Uno", hacer clic derecho sobre esta y seleccione la opción "Actualizar el controlador" (Ver Fig. 71), se abrirá una ventana donde seleccionará "Buscar software de controlador actualizado automáticamente" (Ver Fig. 72), espere que el proceso finalice.

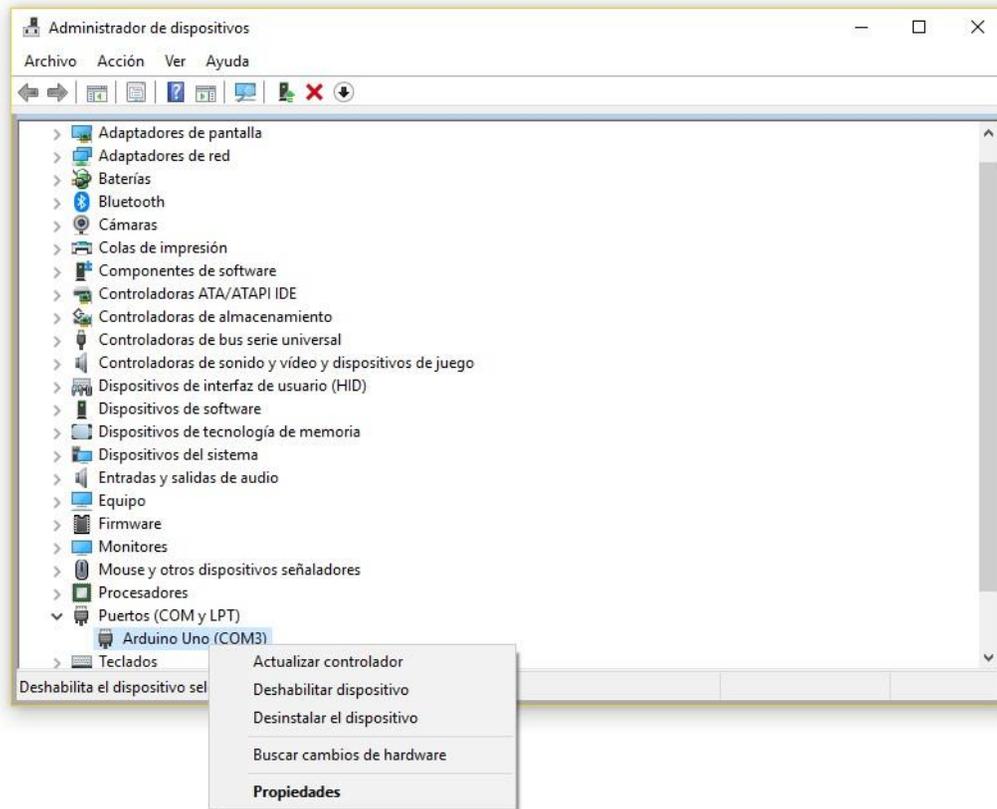


Fig. 71. Ventana del administrador de dispositivos, opciones secundarias.

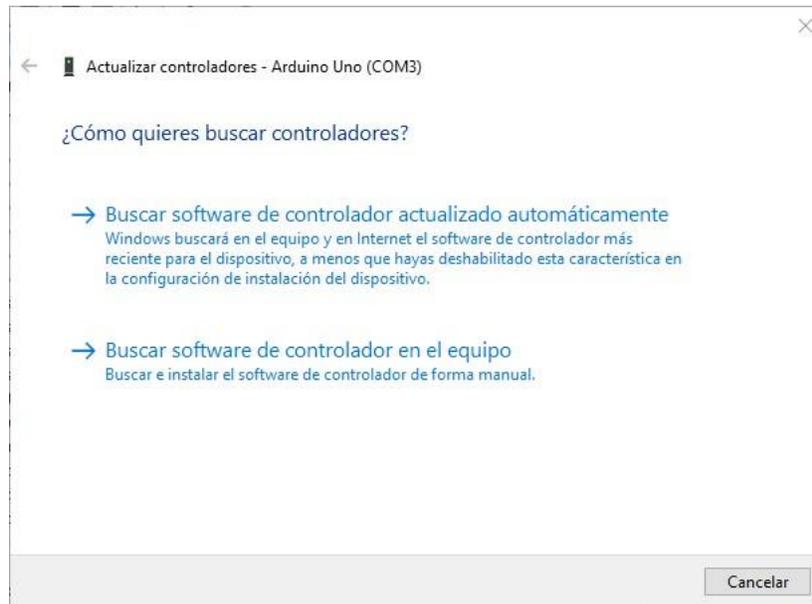


Fig. 72. Ventana de actualización de controlador.

Si el Arduino está conectado, la computadora detecta un problema con el dispositivo, pero en este no enciende ningún led:

- Es posible que la placa esté dañada, si cuenta con otro dispositivo disponible, sustitúyalo, deberá desconectar de la PC y retirar la placa de montaje superficial antes de cambiar el dispositivo dañado. Para usar una nueva placa deberá tener instalado el software "Arduino", primero, conecte la nueva placa Arduino y realice la identificación del puerto COM (ver sección 1.1.1), a continuación, abra el programa "HIPERControl_PI_Matlab.ino", seleccione en la barra la pestaña "Herramientas", seleccione la opción "Placa" y elija en la lista la opción "Arduino/Genuino Uno", posteriormente vuelva a desplegar la lista "Herramientas" (ver Fig. 73) y en la opción "Puerto" seleccione el puerto asignado por la computadora a la placa, finalmente, oprima el botón "Subir" (Ver Fig. 74). de la interfaz. Para colocar nuevamente la placa de montaje superficial, desconecte el dispositivo de la PC.

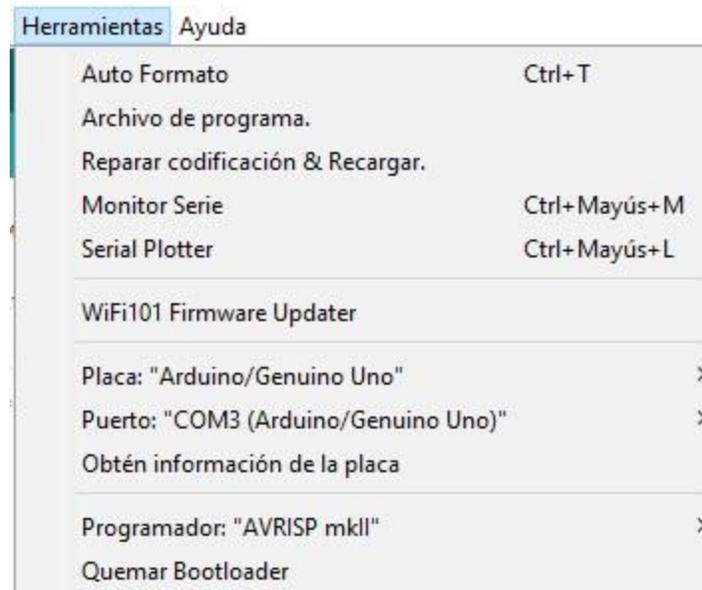


Fig. 73. Pestaña Herramientas de Arduino.



Fig. 74. El botón subir está iluminado en blanco.

3.4.2. No fluye agua por las tuberías.

Este problema puede deberse a un fallo en la bomba hidráulica o en alguna de las válvulas, se recomienda realizar una inspección visual de todo el banco en búsqueda de lo siguiente:

- Sonidos o vibraciones anormales.
- Cables desconectados o en mal estado.
- El nivel de agua del tanque de almacenamiento está por debajo de la altura de la bomba.
- Sobre calentamiento.
- Olor a quemado, partes oscurecidas o calcinadas, cables sulfatados.
- Chispas o cortos circuitos.

Las anomalías más comunes pueden ser:

- Bomba desconectada, con falso contacto o corto circuito: Verifique la instalación eléctrica de la toma de corriente o intente conectar el banco en otro enchufe.
- La altura del tanque de almacenamiento es inferior a lo requerido: Es posible que tenga que purgar la bomba y llenar correctamente el tanque.
- Hay problemas con una de las válvulas:
 - o Es posible que las válvulas sufran desgaste mecánico y por lo tanto no abran correctamente, en este caso se recomienda desarmar la servoválvula, verificar el elemento que presenta desgaste y sustituirlo.
 - o En el caso del servomotor, se puede hacer una prueba muy sencilla abriendo el programa "Servines.ino" y subiéndolo a la placa Arduino, en esta prueba se recomienda no conectar la bomba hidráulica, únicamente el Arduino uno y la etapa de potencia, no olvide accionar el interruptor de seguridad. Una vez subido el programa, abra el monitor serie de Arduino y oprima el número de servo que desea probar "1" equivale al servo a la entrada y "2" equivale al servo a la salida. Verifique que ambos servos muevan las válvulas. Si la válvula esta desgastada es posible que el servo presente vibración al intentar abrirla. Si el servomotor no se mueve, es posible que este dañado o que no esté recibiendo alimentación.



Fig. 75. Ícono del monitor serie de Arduino.

NOTA: Al finalizar las pruebas cargue nuevamente en la placa Arduino el programa "HIPERControl_PI_Matlab.ino" para el correcto funcionamiento del banco.

Para descartar fallos en la etapa de potencia mida con un multímetro el voltaje entre las terminales de salida de la fuente, el valor debe rondar los 5 [V], también revise las conexiones al driver PCA9685.



Fig. 76. Multímetro digital. Para medir el voltaje de la fuente, coloque la perilla en la posición de medición de Voltaje DC.



Fig. 77. Para desarmar la servoválvula, retire todas las tuercas y tornillos.

3.4.3. Problemas con los sensores.

En caso de que al ejecutar la interfaz gráfica se encuentren anomalías en los datos que muestran los sensores de flujo y altura, se recomienda verificar lo siguiente:

- Conexiones: cables desconectados, en mal estado o conexiones erróneas.
- Inspección general de los sensores: puede haber interferencia en el sensor ultrasónico, los sensores pueden estar haciendo corto circuito o presentar evidencias de quemadura.

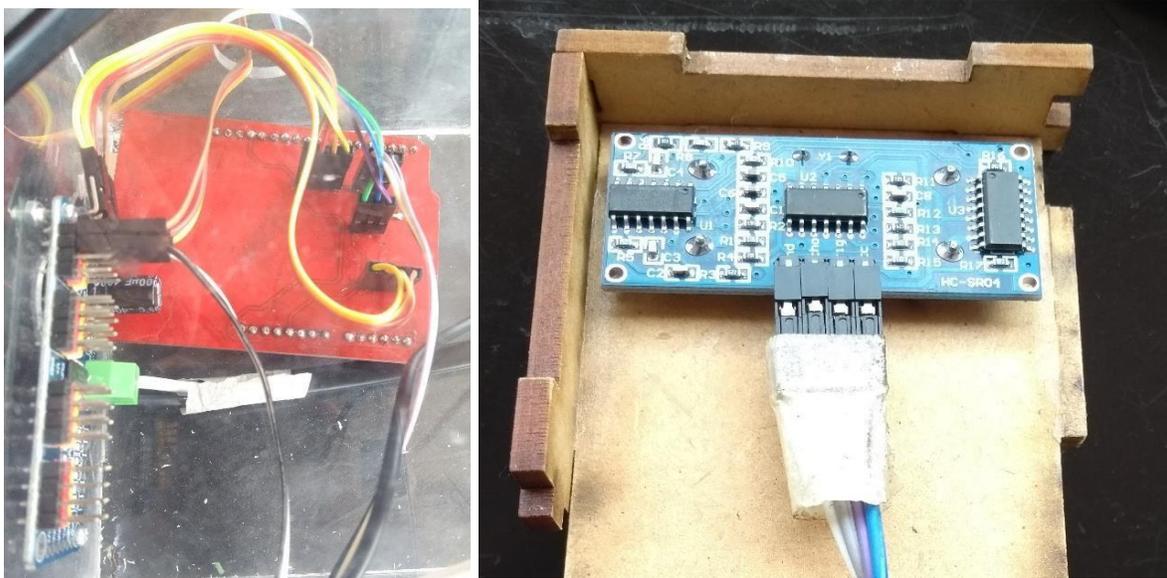


Fig. 78. Revise con detenimiento todas las conexiones.

Si detecta alguna anomalía en un sensor se recomienda subir el programa "HIPERControl_PI_Matlab.ino" a la placa Arduino uno, no conecte la bomba y la etapa de potencia, tampoco ejecute la interfaz gráfica, abra el monitor serie y oprima la tecla "S", comenzará a ver un conjunto de datos de la siguiente forma:

A. AA ; B. BB ; C. CC

Donde:

- A.AA = Valor del sensor ultrasónico.
- B.BB = Valor del sensor de flujo a la entrada.
- C.CC = Valor del sensor de flujo a la salida.

Se concluye problemas con el sensor si se presentan anomalías en las mediciones o si no se recibe ningún valor. Revise si las conexiones se han realizado correctamente y de lo contrario sustituya el sensor.

4. Manual de prácticas.

4.1. Prácticas.

PRÁCTICA 1: FAMILIARIZACIÓN CON EL BANCO DE PRUEBAS.

INTRODUCCION.

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Se ha convertido en una parte importante en sistemas robóticos y mecánicos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. Es deseable que la mayoría de los ingenieros y científicos estén familiarizados con la teoría y la práctica del control automático. (Ogata, 2010)

Los componentes básicos de un sistema de control se pueden describir mediante 3 elementos: Los objetivos de control, los componentes del sistema de control y los resultados o salidas.

La relación básica entre estos tres componentes se ilustra en la Fig. 1 . Los objetivos se pueden identificar como las entradas o señales actuantes, los resultados también son llamados salidas o variables controladas. En general, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control. (Kuo, 1996)

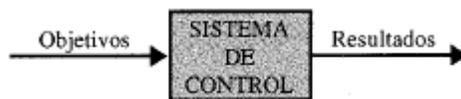


Fig. 79 Componentes básicos del sistema de control.

El banco de pruebas provee de una herramienta que facilita la comprensión de los conocimientos adquiridos en clase con base en la experimentación y la observación del comportamiento y variaciones del sistema en los distintos modos de control que ofrece.

OBJETIVOS.

- Conocer los elementos que componen el banco de pruebas.
- Aplicar las conexiones y procedimientos de seguridad previos a la operación del banco.
- Realizar un primer encendido del banco de pruebas.
- Comparar los modos de control automático.

MATERIALES Y EQUIPO.

- Computadora.
- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Calculadora.
- Etiquetas adhesivas.

DESARROLLO.

Conexiones.

1. Conecte el cable USB a la computadora.
2. Verifique el puerto asignado por la computadora a la placa Arduino Uno. (Vea el apartado 1.1.1 del manual de alumno).
3. Conecte el cable de alimentación de la fuente de voltaje.

Procedimiento de seguridad.

1. Verifique la posición de las válvulas de bypass y alimentación.
2. Realice el procedimiento b). (Vea Manual del alumno sección 1.4)
3. Conecte el cable de alimentación de la bomba hidráulica.

Encendido del banco de pruebas y prueba de control PID.

1. Ejecute el programa GUIServines.exe.
2. Seleccione el puerto serial asignado.
3. Escriba el nombre del archivo de registro en la sección "Log" y oprima iniciar. Se recomienda: "P1_GRUPO_INICIALES_EVENTO".
4. En el apartado "Válvula" seleccione la servoválvula que será controlada por el sistema. En esta práctica seleccione la válvula de entrada.
5. Especifique la apertura de la válvula pasiva, éste es un valor constante durante la operación del banco. Para esta práctica se recomienda 90.

6. Seleccione la pestaña "Automático".
7. En el apartado "Control Type" seleccione "PID".
8. Introduzca los siguientes valores de las constantes: $K_p = 20$, $K_i = 1$, $K_d = 0.01$.
9. Especifique el valor de la altura deseada en el apartado "Nivel_sp".
10. Presione el interruptor de seguridad del sistema de potencia (Posición encendido).
11. Seleccione el botón "iniciar" en la interfaz. Inicie la cuenta en el cronómetro.
12. Realice el procedimiento de seguridad a) con la válvula de bypass abierta completamente. (Vea Manual del alumno sección 1.4)
13. Espere a que el sistema llegue al estado estacionario. Coloque una etiqueta adhesiva a la altura en que se establezca la columna de agua, le facilitará las mediciones. Cuando se llegue a un nivel estable, pause el cronómetro.
14. Tome las medidas requeridas.
15. Oprima el botón "Pausa" de la interfaz y realice el procedimiento de seguridad b).

Comparación de los modos de control automático.

-Control P:

- Realice el procedimiento de encendido, en este caso al elegir "Control Type" seleccione "P" y posteriormente especifique únicamente el valor de $K_p = 20$ (Si lo desea, en eventos adicionales puede modificar el valor de la constante a 25 o 30 y observar cómo influye en la respuesta del banco) y la altura deseada.

-Control PI:

- Repita el procedimiento de encendido cambiando "Control Type" por la opción "PI" y especifique los valores $K_p = 20$, $K_i = 1$ y la altura.

Apagado del banco de pruebas.

1. Realice el procedimiento de seguridad b). (Si lo ha realizado con anterioridad, ignore este paso).
2. Presione el interruptor de seguridad. (Posición apagado)
3. Oprima el botón pausa y cierre el programa GUIServines.
4. Desconecte la bomba hidráulica.
5. Desconecte la fuente de voltaje.
6. Desconecte el cable usb de la computadora (No requiere extracción segura).

REGISTRO DE EVENTOS Y RESULTADOS.

En el desarrollo de la práctica se tienen contemplados 3 eventos, el primero de ellos empleando control PID, el segundo con control P y finalmente con control PI. El profesor puede indicar la realización de eventos adicionales variando los valores introducidos en la interfaz.

Evento	Tipo de control	Kp	Ki	Kd	Altura esp. [cm]	Flujo de entrada [l/min]	Flujo de salida [l/min]	Altura exp. [cm]	Tiempo [min:seg]	%Error Altura
1	PID	20	1	0.01						
2	P	20	X	X						
3	PI	20	1	X						
4										
5										

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Compare los resultados obtenidos con cada tipo de control.

Responda las siguientes preguntas:

- ¿Qué tipo de control permite obtener los resultados más precisos? ¿Cuál presenta mayor grado de error?
- ¿Qué tipo permite obtener resultados más rápidos? ¿Cuál es el más lento?
- ¿Cuál es el tipo de control más estable?
- Si tuviera que elegir sólo un tipo de control para operar el banco de pruebas ¿Cuál elegiría?

PRÁCTICA 2. CONTROL MANUAL.

INTRODUCCION.

En un sistema de control en lazo abierto las entradas se introducen a un controlador que genera señales actuantes que inciden directamente en el sistema controlado produciendo una salida, como se ilustra en la Fig. . Al no existir retroalimentación de los resultados obtenidos a la salida, se obtiene un sistema simple pero que no puede satisfacer requerimientos de desempeño críticos. (Kuo, 1996)

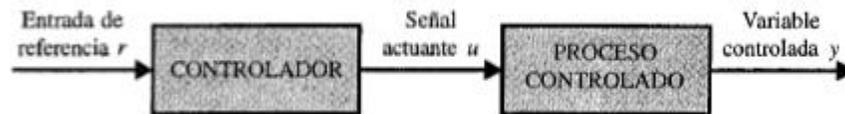


Fig. 80. Diagrama: sistema de control en lazo abierto.

Tomando por ejemplo el acelerador de un automóvil, el sistema recibe la entrada cuando el conductor aplica presión sobre el pedal, el motor responde aumentando las revoluciones y, por tanto, la velocidad del auto, sin embargo, si se deja de presionar el pedal, las revoluciones disminuyen. Como puede notarse, el sistema responde a las entradas, pero regresa a su estado normal si estas dejan de aplicarse (Kuo, 1996). A este tipo de control le llamaremos de lazo abierto o manual.

El banco de pruebas cuenta con dos formas de control manual distintas. La primera permite ajustar el flujo deseado en la servoválvula activa, la segunda controla a través de un conjunto de comandos el ángulo de apertura de cada servoválvula.

Se recomienda precaución al operar con estos métodos ya que es posible causar el desbordamiento de la columna de agua.

OBJETIVOS.

- Aprender a utilizar el modo de flujo constante.
- Estabilizar la altura empleando el modo manual.
- Aplicar el procedimiento de seguridad en caso de desbordamiento.

MATERIALES Y EQUIPO.

- Flexómetro.
- Etiquetas adhesivas

DESARROLLO.

-Modo manual con flujo constante.

1. Realice los procedimientos indicados en los apartados "Conexiones", "Procedimientos de seguridad" y "Encendido del banco de pruebas" de la práctica anterior, de éste último proceda sólo hasta el inciso 5).
2. En el apartado "Control mode" seleccione la opción "Flujo constante".
3. Indique el flujo de agua en l/min. (Se recomiendan valores entre 3-10).
4. Continúe con el procedimiento indicado en "Encendido del banco de pruebas" a partir del inciso 10).

¿Es posible estabilizar el nivel de la columna de agua en un valor constante modificando el flujo deseado y la apertura de la válvula pasiva?

-Modo manual controlado por perillas.

1. Lleve a cabo las conexiones y los procedimientos de seguridad.
2. Realice la secuencia indicada en la sección "Modo manual" del manual del alumno.
3. Modifique la apertura de las servoválvulas con los comandos correspondientes.
4. Establezca diferentes ángulos de apertura en las servoválvulas.

¿Es posible estabilizar el nivel de la columna de agua en un valor constante modificando la apertura de cada servoválvula? Si es así coloque una etiqueta adhesiva en la columna a la altura obtenida.

-Si ocurre desbordamiento de la columna.

- Actúe de inmediato para evitar daños en los componentes. Realice el procedimiento de seguridad b). (Vea Manual del alumno sección 1.4).

REGISTRO DE EVENTOS Y RESULTADOS.

Para el desarrollo de esta práctica se tienen contemplados dos eventos, sin embargo, se sugiere realizar más eventos para familiarizarse con estos modos de operación.

Evento	Tipo de control	Flujo especificado [l/min]	Apertura de válvula de entrada	Apertura de válvula de salida	Flujo de entrada [l/min]	Flujo de salida [l/min]	¿Estable? ✓ / X	Altura obtenida [cm]
1	Flujo cte.							
2	Perillas	X						
3								
4								
5								

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Reflexione sobre la respuesta del sistema y las dificultades que se tuvieron para obtener una altura estable.

Conteste lo siguiente:

- ¿Fue fácil llegar a una altura concreta en el modo de flujo constante? ¿Cuáles fueron las principales dificultades a las que se enfrentó?
- ¿Logró establecer una altura estable en el modo de control por perillas? ¿Cuáles fueron las principales dificultades a las que se enfrentó?
- ¿Qué acciones recomendaría para mejorar el funcionamiento de los modos manuales?
- ¿Qué características, a su parecer, deben poseer las aplicaciones en las que un control de lazo abierto es suficiente para obtener resultados favorables?
- Proponga 5 ejemplos de uso cotidiano donde se tenga un control de lazo abierto.

PRÁCTICA 3: CONTROL PROPORCIONAL.

INTRODUCCION.

Para obtener un control más exacto, la señal de controlada debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para corregir el error. A este sistema se le denomina "sistema en lazo cerrado" o control automático. (Kuo, 1996)

El siguiente diagrama muestra las trayectorias de las señales en un sistema de lazo cerrado, como puede observarse, en un primer momento, cuando la salida del sistema puede considerarse cero, la señal de entrada o referencia se introduce al controlador generando una acción de control que incide en el sistema, esta produce una respuesta que es realimentada a un comparador que determina la desviación entre ésta y la señal de referencia, esta diferencia se introduce nuevamente al controlador para generar una nueva acción de control que reduzca el margen de error a la salida, este proceso se repite hasta que se llega a un estado estable.

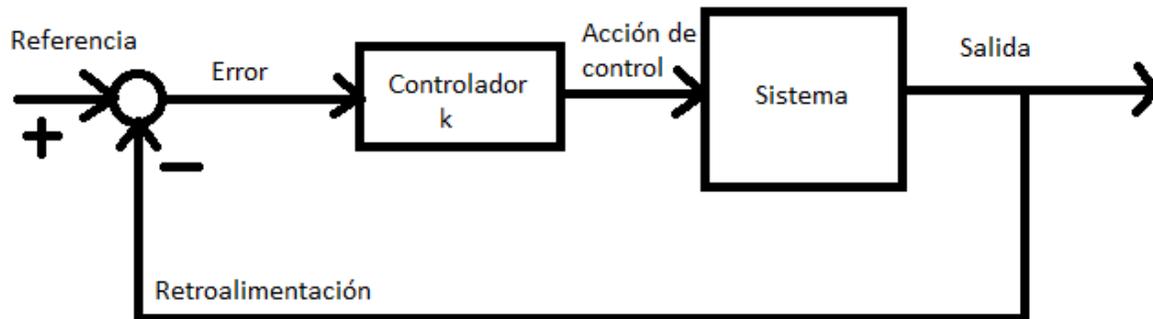


Fig. 81. Diagrama de bloques del control proporcional.

En un sistema de control en lazo cerrado de tipo proporcional, el controlador multiplica la señal de error por una constante. Se debe tener especial cuidado con los valores de las constantes ya que el introducir un valor erróneo puede ocasionar inestabilidades en el sistema.

OBJETIVOS.

- Conocer el funcionamiento del control proporcional.
- Señalar las ventajas y desventajas de este tipo de control.
- Reconocer la influencia de la constante de proporcionalidad en el comportamiento del sistema.

MATERIALES Y EQUIPO.

- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Calculadora.
- Etiquetas adhesivas.

DESARROLLO.

En esta práctica llevaremos a cabo 5 eventos con distintos valores de la constante, de esta forma, podremos obtener resultados distintos para una misma altura. Si el profesor lo considera pertinente, se pueden realizar más eventos cambiando la altura deseada y los valores de la constante. El procedimiento para cada evento es el siguiente:

1. Realice los procedimientos para encendido del banco y posteriormente configure la interfaz, recuerde seleccionar control automático, tipo P e introduzca los valores de la constante y la altura deseada (Los datos se encuentran en la tabla de resultados).
2. Presione el botón "inicio" y al mismo tiempo inicie la cuenta del cronómetro, recuerde abrir las válvulas como se indica en el procedimiento a). (Manual de alumno, sección 1.4).
3. Cuando se estabilice la altura, coloque una etiqueta adhesiva en el nivel obtenido y finalice la cuenta del cronómetro.
4. Tome las medidas pertinentes.
5. Pare el programa y aplique el procedimiento b). Espere a que la columna se vacíe completamente. Repita el procedimiento.

REGISTRO DE EVENTOS Y RESULTADOS.

Se contemplan 5 eventos, si desea realizar más, se recomienda establecer una altura constante y variar los valores de Kp.

Evento	Kp	Altura esp. [cm]	Flujo de entrada [l/min]	Flujo de salida [l/min]	Altura obtenida [cm]	Tiempo [min:seg]	%Error Altura
1	15	40					
2	20	40					
3	25	40					
4	30	40					
5	35	40					
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

Para cada altura establecida grafique Kp vs Tiempo (en segundos) y Kp vs %Error

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Observe las gráficas generadas. Discuta con sus compañeros la efectividad del control proporcional.

Responda lo siguiente:

- ¿Con qué valor de K_p se obtuvieron resultados más exactos? ¿Cuál es el más inexacto?
- ¿Cuál es el valor que hace que la altura se estabilice más rápido? ¿Qué valor tardó más en obtener una altura constante?
- ¿Existe alguna relación entre el valor de K_p y la exactitud de los resultados?
- ¿Existe alguna relación entre el valor de K_p y el tiempo de asentamiento del sistema?
- ¿Cuáles son las ventajas de este tipo de control? ¿Y las desventajas?
- Ejemplifique una aplicación donde el control proporcional sea suficiente para obtener resultados aceptables.

PRÁCTICA 4: CONTROL PI.

INTRODUCCION.

En realidad, no existen controladores que actúen únicamente con acción integral, siempre actúan en combinación una acción proporcional, complementándose. (Mazzone, 2002) Cabe mencionar que en un controlador PI, la acción proporcional tiene doble efecto, ya que afecta también a la parte integrativa, es decir, el valor de la constante integrativa depende del valor de la constante proporcional y del tiempo de acción integrativa (T_i), que es el tiempo que esta acción estará incidiendo sobre el comportamiento del sistema. En el dominio de la frecuencia, esta relación puede expresarse como:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al control PI.

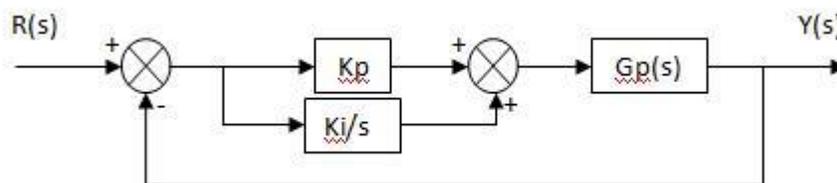


Fig. 82. Diagrama de bloques, control PI.

Donde K_p y K_i son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si T_i es grande el efecto de la acción integral será atenuado, y viceversa. (Mazzone, 2002)

OBJETIVOS.

- Identificar la influencia de la constante integrativa en el comportamiento del sistema.
- Explicar las ventajas del control PI sobre otros tipos de control.
- Comprender las desventajas del control PI.

MATERIALES Y EQUIPO.

- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Calculadora.

- Etiquetas adhesivas.

DESARROLLO.

Se llevarán a cabo 6 eventos, variando las constantes proporcional e integrativa y con una altura constante. Se deja a consideración del profesor realizar más eventos con variaciones en todos los parámetros. Seguiremos el siguiente procedimiento.

1. Realice las conexiones del banco y posteriormente configure la interfaz, recuerde seleccionar control automático, tipo PI e introduzca los valores de las constantes y la altura deseada (Los datos se encuentran en la tabla de resultados).
2. Presione el botón "inicio" y al mismo tiempo inicie la cuenta del cronómetro, recuerde abrir las válvulas como se indica en el procedimiento a). (Manual de alumno, sección 1.4).
3. Cuando se estabilice la altura, coloque una etiqueta adhesiva en el nivel obtenido y finalice la cuenta del cronómetro.
4. Tome las medidas pertinentes.
5. Pare el programa y aplique el procedimiento b). Espere a que la columna se vacíe completamente. Repita el procedimiento.

REGISTRO DE EVENTOS Y RESULTADOS.

Se contemplan 6 eventos, divididos en 2 grupos de 3 eventos cada uno, si desea realizar más, se recomienda establecer una altura y valor de K_p constantes y posteriormente variar los datos de K_i .

Evento	K_p	K_i	Altura esp. [cm]	Flujo de entrada [l/min]	Flujo de salida [l/min]	Altura obtenida [cm]	Tiempo [min:seg]	%Error Altura
1	25	0.95	30					
2	25	1	30					
3	25	1.05	30					
4	20	0.9	30					
5	20	1	30					

6	20	1.1	30					
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Para cada altura y K_p , grafique K_i vs Tiempo y K_i vs %Error.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En base a lo obtenido en las gráficas, comente con sus compañeros el comportamiento de la variable integrativa en los resultados y responda lo siguiente:

- ¿Con qué valor de K_i se obtuvieron resultados más exactos? ¿Cuál es el más inexacto?
- ¿Cuál es el valor que hace que la altura se estabilice más rápido? ¿Qué valor tardó más en obtener una altura constante?
- ¿Existe alguna relación entre el valor de K_i y la exactitud de los resultados?
- ¿Existe alguna relación entre el valor de K_i y el tiempo de asentamiento del sistema?
- ¿Existió alguna modificación al variar K_p ?
- ¿Cuáles son las ventajas de este tipo de control? ¿Y las desventajas?
- ¿Vale la pena aumentar la complejidad y los costos al implementar un control PI en comparación con el control proporcional?
- En qué aplicaciones será más conveniente aplicar control PI. De 3 ejemplos.

PRÁCTICA 5: CONTROL PID.

INTRODUCCION.

Más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado. La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. (Ogata, 2010)

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Esta última acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. (Mazzone, 2002)

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del controlador PID.

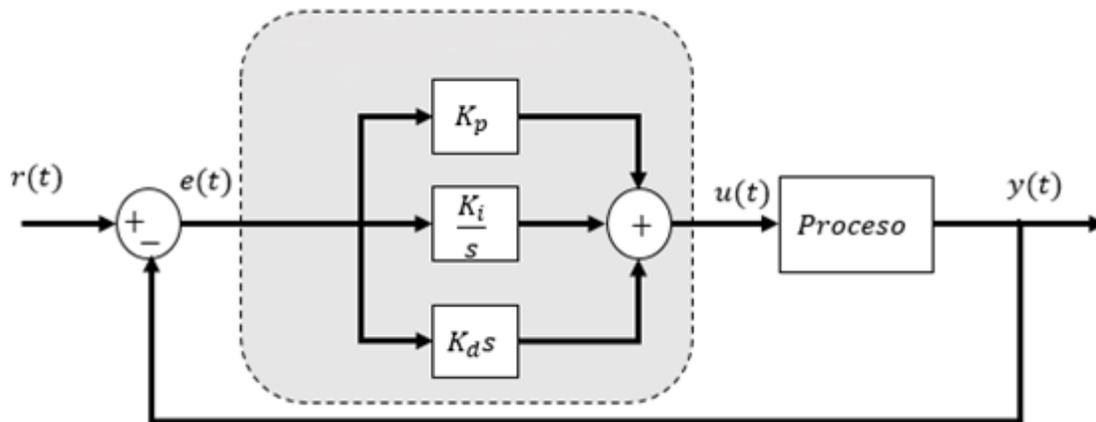


Fig. 83. Controlador PID.

Como se mencionó con anterioridad, el control PID puede aplicarse a sistemas sin necesidad de conocer su modelo matemático, esto facilita su implementación en gran cantidad de sistemas. Para aplicar el control PID a un sistema, se diseñaron las reglas de Ziegler-Nichols.

OBJETIVOS.

- Comprobar la efectividad del control PID.
- Comparar con otros tipos de control.
- Señalar las ventajas y desventajas del control PID.
- Conocer la influencia de la constante derivativa en el comportamiento del sistema.

MATERIALES Y EQUIPO.

- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Calculadora.
- Etiquetas adhesivas.

DESARROLLO.

Para la realización de esta práctica se tienen contemplados 6 eventos, divididos en pares, en ellos se mantiene una configuración de K_p , K_i y altura constantes y se varía únicamente el valor de K_d .

Siga el procedimiento empleado en las dos prácticas anteriores, no olvide seleccionar el modo de control PID e introducir los valores indicados en la tabla de resultados.

REGISTRO DE EVENTOS Y RESULTADOS.

Evento	K_p	K_i	K_d	Altura esp. [cm]	Flujo de entrada [l/min]	Flujo de salida [l/min]	Altura obtenida [cm]	Tiempo [min:seg]	%Error Altura
1	20	1	0.005	30					
2	20	1	0.01	30					
3	20	0.9	0.005	30					
4	20	0.9	0.01	30					
5	25	1	0.005	30					
6	25	1	0.01	30					

Para cada par de eventos grafique K_d vs tiempo y K_d vs %Error.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Revise las gráficas generadas, compárelas y discuta con sus compañeros las particularidades que encuentre en cada una de ellas.

- ¿Cuál es la combinación de valores con la mejor exactitud? ¿Cuál es la peor?
- ¿Qué combinación de valores permite obtener resultados estables más rápido? ¿Cuál fue la más tardada?
- ¿Cuáles son las ventajas de este tipo de control?
- Considerando que la implementación es sencilla pero que aumenta la carga de trabajo del controlador, la complejidad del sistema y el costo ¿Vale la pena implementar un control PID?
- De ejemplos de aplicaciones donde el control PID proporcione resultados óptimos.

Escriba junto a cada aplicación el tipo de control que considere más adecuado (P, PI, PD), tome en cuenta complejidad, costo, importancia, y que tanta exactitud se necesita.

- Llenado de cisterna y tinaco de una unidad habitacional:
- Llenado de moldes para producir medicamentos.
- Control de la temperatura de un calentador de agua doméstico.
- Máquina de corte de precisión.
- Embotelladora de líquidos de alta viscosidad.

4.2. Notas para el profesor.

PRÁCTICA 1.

El propósito principal de ésta práctica es que el alumno practique el procedimiento de puesta en marcha del banco de pruebas, se espera que al finalizar sea capaz de poner en marcha un evento distinto a los propuestos desde cero.

Otra de las intenciones de la práctica es que el alumno conozca la interfaz, ubique los principales indicadores y sea capaz de obtener mediciones con ayuda de ellos.

Se propone en la sección "Análisis de resultados" que el alumno reflexione acerca del comportamiento de los modos de control P, PI y PID y que esto pueda sentar un

precedente para los contenidos que se irán desarrollando conforme se avance en las prácticas.

Se le sugiere proponer eventos adicionales, por ejemplo, establezca un valor de altura constante (distinto al indicado en la práctica) y en conjunto con los alumnos defina los valores de las constantes dentro del rango recomendado, posteriormente aplíquelos a una corrida con control proporcional, una con PI, y una con PID.

Se recomienda que antes de iniciar la próxima práctica los alumnos compartan las respuestas que dieron a la sección "Análisis de resultados" y se genere debate respecto a ellas. Promueva que en conjunto se elaboren pequeñas sentencias que recojan los principales conocimientos adquiridos, por ejemplo, "El control proporcional tiene un margen de error que no se puede evitar", etc.

PRACTICA 2.

Para esta práctica se ha buscado que el alumno comprenda la dificultad que representa emplear un esquema de control de lazo abierto para obtener resultados estables. Además, se espera que el alumno, en base a sus conocimientos teóricos pueda llegar a la conclusión de que se necesita revisar qué sucede con la salida al aplicar una entrada al sistema y comparar si el resultado es lo que se desea, de esta forma se intenta crear un precedente para que más adelante el alumno comprenda la importancia de la retroalimentación en un control de lazo cerrado.

Además, al contestar las preguntas del "Análisis de Resultados" se trata que el alumno reconozca la forma en la que un sistema responde a un control de lazo abierto, de tal forma que pueda relacionarlo con situaciones de su vida cotidiana.

La operación del modo de flujo constante está orientada a que el alumno tenga conciencia de que es probable que al aplicar una entrada constante al sistema no se obtenga una salida estable.

Es posible que durante el desarrollo de esta práctica se logre desbordar la columna, se recomienda que propicie que suceda por lo menos una vez para que el alumno ponga en práctica el procedimiento de seguridad correspondiente.

No todos podrán estabilizar la columna de agua, instruya a los alumnos para que al utilizar el control manual se evite realizar ajustes menores a 5 grados sexagesimales, ya que es posible que el servomotor no realice la acción solicitada.

PRÁCTICA 3.

En esta práctica el propósito principal es que el alumno se familiarice con la respuesta que se obtiene al aplicar un esquema de control de lazo cerrado proporcional. Se recomienda hacer eventos adicionales a los propuestos para apoyar el análisis de los resultados, por ejemplo, establezca una altura constante y realice algunos eventos variando el valor de la constante, de esta forma, se podrá establecer una relación a través de las gráficas entre la constante y el margen de error o el tiempo de respuesta.

Otra intención de esta práctica es que el alumno identifique las ventajas y desventajas de este esquema de control, de tal forma que pueda sopesar si una aplicación específica requiere un nivel de precisión compatible con este tipo de control o si se necesita mayor precisión. Proponga un análisis de costos, complejidad y beneficios, en la Práctica 5, se espera que el alumno pueda decidir el esquema de control que más convenga para una aplicación específica tomando en cuenta estos parámetros.

Se recomienda compartir con el alumnado las consecuencias de establecer un valor de la constante que provoque inestabilidades en el sistema.

PRÁCTICA 4.

Al finalizar esta práctica se espera que el alumno pueda reconocer la influencia de la constante integrativa en la respuesta del sistema. Realice una pequeña comparación con los resultados obtenidos en la práctica anterior para ayudar a que los alumnos identifiquen las principales ventajas y desventajas de este esquema de control.

Al igual que la práctica anterior, haga notar que la complejidad del sistema aumenta y por lo tanto los costos de su implementación. Propicie que los alumnos razonen si es conveniente este sacrificio en comparación con los beneficios que se obtienen.

Propicie que los alumnos comparen los eventos con el mismo valor de K_i pero distinto valor de K_p , para reforzar la influencia de la constante proporcional en este esquema de control.

En cualquier momento puede surgir un problema con los componentes del sistema, se recomienda guiarse del manual del profesor para buscar dar solución oportuna a

éstos. Sería interesante que los alumnos participen brindando ideas para la solución del problema con el objetivo de reforzar sus conocimientos de Instrumentación.

PRÁCTICA 5.

Ésta práctica es la culminación de los esfuerzos realizados durante las actividades anteriores encaminados a propiciar el aprendizaje de los esquemas de control.

El principal propósito es que el alumno comprenda la eficacia del control PID en comparación con los esquemas manejados con anterioridad, además de la influencia que la acción derivativa ejerce sobre la estabilidad del sistema, se recomienda transmitir a los alumnos la importancia de ser cauteloso al implementar una constante derivativa ya que se pueden tener resultados adversos, si desea implementar una configuración en la que el sistema pierda estabilidad se sugiere hacerlo bajo su responsabilidad y evitar la exposición durante periodos prolongados.

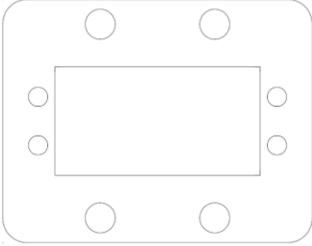
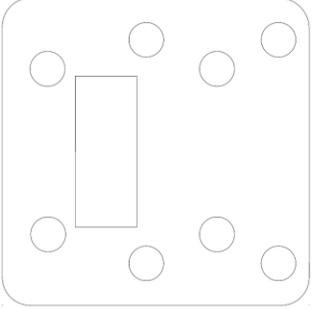
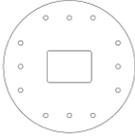
Se espera que, al finalizar esta práctica, el alumno sea capaz de sopesar los costos, complejidad y beneficios de cada opción y aplique su criterio para decidir qué opción es más recomendable para una aplicación en especial.

En la última actividad del "Análisis de resultados" se eligieron tales aplicaciones por las siguientes características:

- Llenado de cisterna y tinaco de una unidad habitacional: Lento, se requiere precisión moderada.
- Llenado de moldes para producir medicamentos. Proceso de alta precisión y velocidad.
- Control de la temperatura de un calentador de agua doméstico. Se requiere poca precisión. El tiempo de respuesta es moderado.
- Máquina de corte de precisión. Alta precisión. La planta es variable y es posible que no se conozca su modelo matemático.
- Embotelladora de líquidos de alta viscosidad: Proceso lento, requiere buen grado de precisión.

5. Manual de armado de la servoválvula.

5.1. Materiales y equipo.

Nombre	Imagen
Pieza superior. (acrílico)	
Pieza inferior. (acrílico)	
Cople para válvula. (acrílico)	
Cople del servomotor.	
4 Pernos largos. (Ø 6 mm.)	

2 abrazaderas en forma U (Ø 6 mm.)	
20 tuercas. (Ø 6 mm.)	
2 Pernos cortos (Ø 4 mm.)	
2 tuercas para perno corto (Ø 4 mm.)	
2 tornillos para cople. (Incluidos en la caja del servomotor)	
Desarmador de cruz #0.	

<p>Pinzas.</p>	
<p>Plastilina epóxica.</p>	
<p>Herramienta rotativa Dremel 3000.</p>	
<p>Servomotor HD-1501MG</p>	
<p>Válvula</p>	

5.2. Generación de piezas de acrílico. (Opcional)

Para fabricar las piezas que se utilizan en el ensamble de la servoválvula es necesario realizar un corte laser a partir de una lámina de acrílico de 3 mm de espesor, para ello le serán solicitados los archivos DWG (Autocad) de los modelos: *pieza_inferior.dwg*, *pieza_superior.dwg* y *cofle.dwg*.

Se recomienda acudir a un local especializado en corte laser con los 3 archivos guardados en una memoria USB y preferentemente con el material de donde se desea cortar las piezas (es posible que el local pueda proveer el material, pero esto incrementaría el costo), adicionalmente, es deseable que se corten varias unidades de cada pieza con el fin de tenerlas como repuesto en caso de que alguna sufra daños o si se requiere fabricar más servoválvulas en el futuro. Para el corte se debe utilizar una lámina de acrílico de 3 mm de espesor y solicitar tolerancias de 0.5 mm.

5.3. Acondicionamiento de la válvula.

Este proceso consiste en dos actividades principales, la unión del cofle de acrílico con el eje de la válvula y la colocación del eje del servomotor atornillado a la pieza anterior.

- Unión del cofle de acrílico con el eje de la válvula.

Antes de proceder con la unión es necesario retirar el maneral de la válvula, para ello únicamente se requiere retirar con ayuda de las pinzas la tuerca que lo mantiene en su sitio. Asegúrese de que la válvula se encuentre en la posición completamente cerrada antes de comenzar a trabajar, ya que más adelante será necesario para sincronizar el servo.



Fig. 84. Válvula utilizada.

A continuación, se utilizará plastilina epóxica para pegar el cople de acrílico al eje de la válvula:

- Humedezca sus manos ligeramente, corte la cantidad que considere necesaria de ambas tiras (se requiere exactamente la misma cantidad de ambas partes, por lo general, para pegar una pieza se utiliza una porción de 1 cm de largo).
- Mezcle ambas partes con sus manos hasta obtener una pasta homogénea color verde claro.
- Forme una esfera y colóquela sobre el eje de la válvula, coloque el cople de acrílico sobre esta esfera y presione hasta que encaje en el eje.
- Presione la plastilina que se encuentra debajo del cople hasta que esté lo suficientemente compacta y adherida a ambas partes.
- Verifique que el cople esté nivelado, corrija cualquier desviación inmediatamente, repita el paso anterior si es necesario. Este paso es muy importante ya que una desviación en esta pieza puede provocar un mal funcionamiento de la servoválvula.
- Deje secar durante 4 horas como mínimo, se recomienda dejar secar toda la noche.



Fig. 85. Ejemplo de colocación del cople de acrílico.

-Colocación del cople del servomotor.

Es normal que al colocar la pieza anterior quede excedente de plastilina epóxica que sobresale del cople de acrílico por lo que será necesario lijarlo hasta tener una superficie lisa, para esto se necesitará la herramienta rotatoria Dremel 3000 con el accesorio de fresa ovalada.

Coloque el accesorio "fresa ovalada" en el Dremel 3000, si tiene dudas de cómo realizar este proceso, consulte el manual de usuario del equipo, seleccione la velocidad más baja posible y retire el excedente de plastilina hasta obtener una superficie lisa y uniforme.

A continuación, se perforarán los orificios donde irán los tornillos que sujetan el cople de la válvula y el cople del servomotor, para ello coloque en el Dremel 3000 la broca de 2.8 mm y perfore orificios en ambas piezas, es necesario que ambos orificios se encuentren en posiciones diametralmente opuestas. (El servomotor incluye 3 coples con distintas geometrías, se recomienda utilizar el cople redondo o en su defecto el cople de 4 brazos, si utiliza este último será necesario recortar tales brazos para evitar interferencias con el resto de componentes.)

Finalmente coloque el cople del servomotor encima del cople de acrílico acoplado a la válvula de tal forma que los orificios realizados anteriormente coincidan e introduzca un tornillo corto en cada uno, atornille hasta que éstos se encuentren completamente introducidos.



Fig. 86. Ensamble del cople del servomotor sobre el cople de acrílico.

5.4. Colocación de la válvula en la pieza inferior.

La pieza inferior consta de 8 orificios circulares y un orificio rectangular, para colocar la válvula correctamente asegúrese que la protuberancia de la válvula coincida con el orificio rectangular de la pieza.

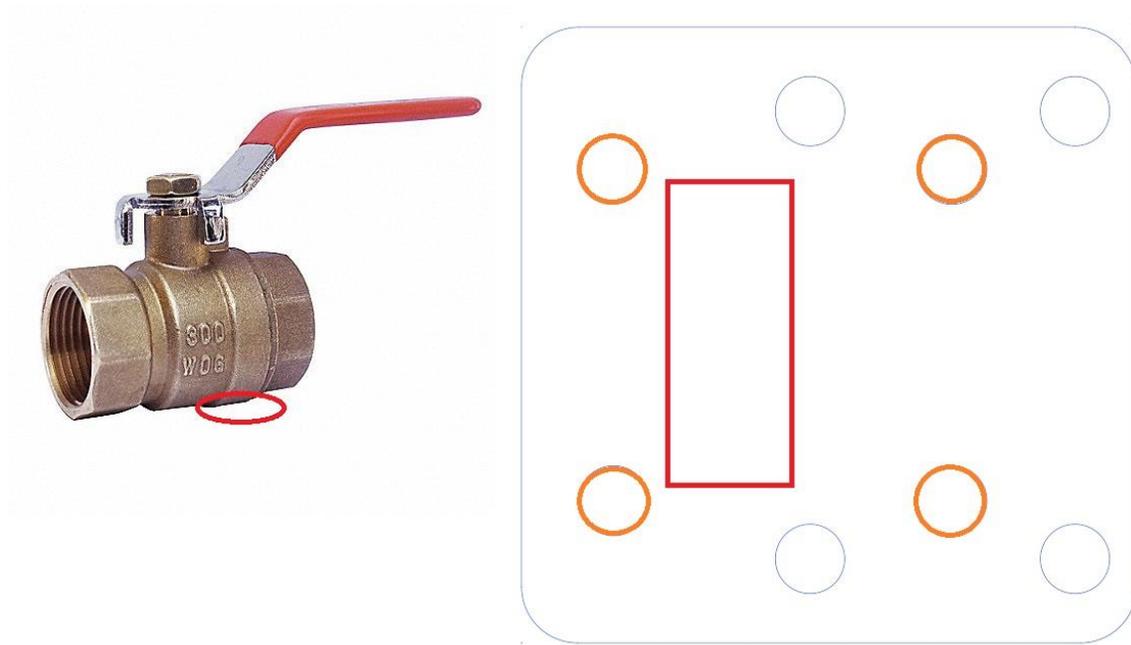


Fig. 87. La protuberancia señalada en el círculo rojo debe coincidir con el rectángulo mostrado, los círculos naranjas indican los orificios que servirán para introducir las abrazaderas.

Tome una abrazadera en forma U, introduzca una tuerca en cada uno de los extremos y gírela hasta alcanzar la mitad del recorrido. Repita este procedimiento con la otra abrazadera. En algunas ocasiones será necesario rebajar algunas imperfecciones en el cuerpo de la válvula para lograr que las abrazaderas se introduzcan por completo, se recomienda probar antes de introducir las tuercas si no existe algún elemento que haga interferencia con las abrazaderas.

Introduzca los extremos de las abrazaderas en los orificios señalados en color naranja (vea figura anterior) y comience a girar las tuercas de forma que las abrazaderas comiencen a descender, al finalizar ambas abrazaderas harán contacto por completo con el cuerpo de la válvula.

Finalmente, gire cuidadosamente el conjunto e introduzca tuercas en los extremos de las abrazaderas, ajuste las tuercas hasta que hagan presión sobre el acrílico. Si es necesario corrija el ajuste de las tuercas superiores para lograr que el cuerpo de la válvula esté asegurado totalmente.



Fig. 88. Apariencia del ensamble de la pieza inferior.

5.5. Armado de la pieza superior.

En este apartado se realizará el ensamble de la pieza superior, para ello se deberá introducir el servomotor en el orificio correspondiente, comience pasando el cable e introduzca el servo inclinado para evitar que se dañe.

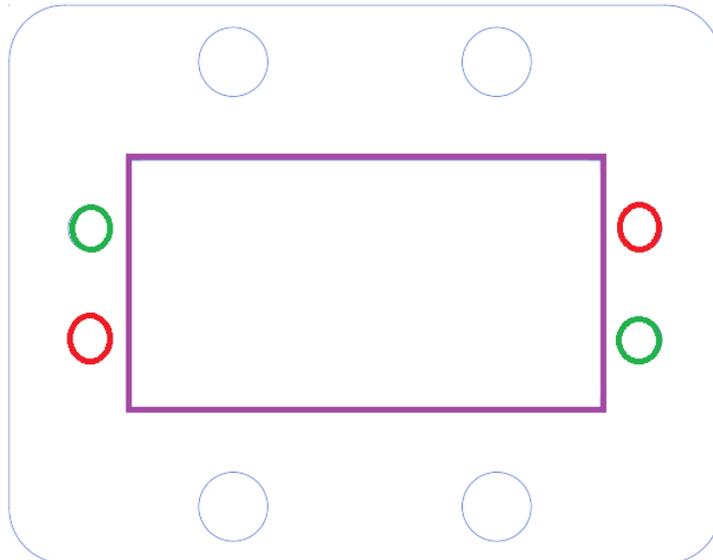


Fig. 89. El servomotor debe introducirse dentro del recuadro morado, las parejas de orificios para los tornillos se muestran con colores coincidentes.

A continuación, tome dos tornillos M4 de $\frac{1}{2}$ " de largo con sus respectivas tuercas e introdúzcalos en los orificios pequeños de la pieza, se recomienda introducirlos por la parte inferior colocando las tuercas en la parte superior, de tal forma se facilitará el ensamble, atornille hasta que hayan finalizado su recorrido, es necesario que ambos tornillos se encuentren en posiciones opuestas, como se señala en la figura anterior.

Finalmente introduzca 4 pernos largos en los orificios correspondientes y asegúrelos con tuercas, introduzca una tuerca adicional en cada perno y ajústela hasta llegar a la mitad del recorrido, será útil en el próximo apartado.

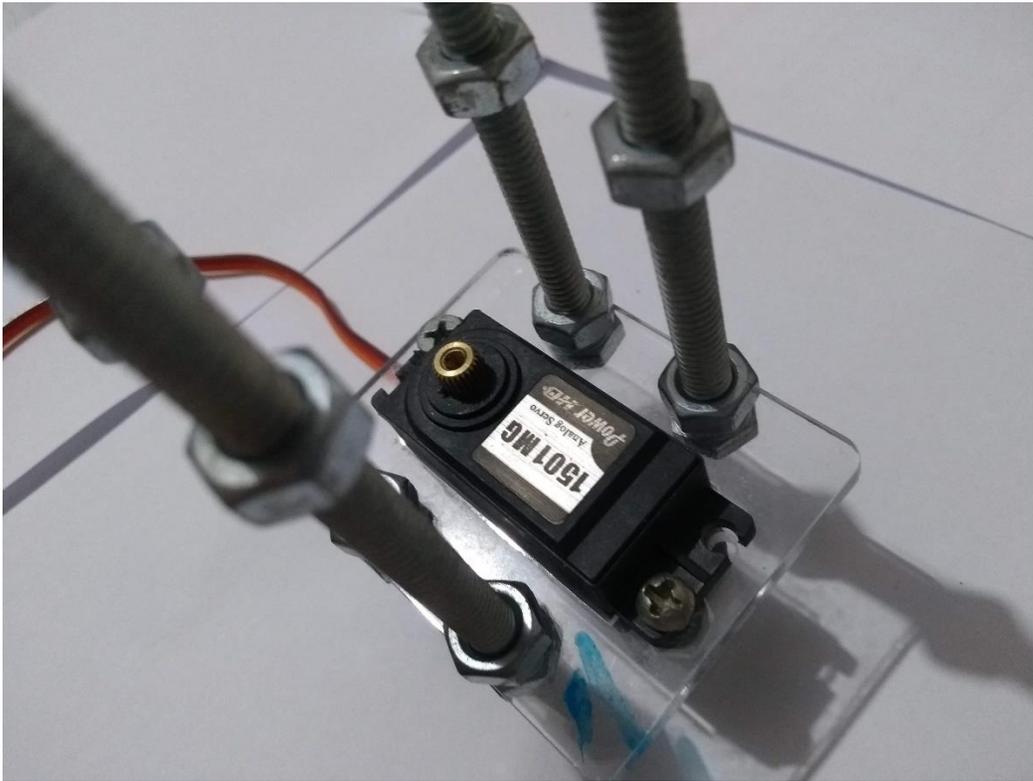


Fig. 90. Apariencia de la pieza superior armada.

5.6. Ensamblaje final de la servóvalvula.

Antes de unir ambas piezas se sincronizará el servomotor con la válvula. En apartados anteriores se sugirió colocar la válvula en la posición totalmente cerrada, en caso de no haberlo hecho, gire el eje hasta llegar a esta posición.

-Sincronización del servomotor.

Conecte el servomotor (acoplado a la pieza superior) al cable correspondiente en el banco de pruebas y ejecute el programa de "Control Manual", posteriormente indique a dicho servomotor colocarse en la posición 0, finalmente, corte la alimentación del sistema y desconecte el servo del banco de pruebas.

- Unión de parte inferior y superior.

Para finalizar el ensamblaje de la válvula introduzca los extremos de los pernos que sobresalen de la pieza superior en los orificios de la pieza inferior correspondientes. Vea la siguiente figura.

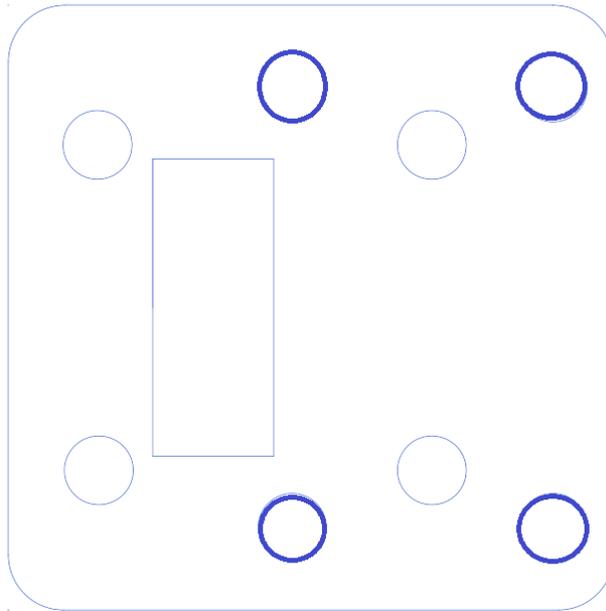


Fig. 91. Los orificios señalados corresponden a los pernos largos.

Verifique que el cople del servo encaje con el eje de éste, de no ser así deberá hacer pequeños ajustes en el eje de la válvula hasta lograr que encajen perfectamente, este punto es muy importante ya que si el eje y el cople no coinciden se corre el riesgo de dañar el cople, lo que impediría el correcto funcionamiento de la servóválvula.

Introduzca el eje del servo dentro del cople, ajuste las tuercas intermedias de los pernos hasta que hagan contacto con el acrílico de la pieza inferior, posteriormente introduzca una tuerca en cada perno por la parte inferior y ajústela hasta que haga presión sobre el acrílico. Si es necesario modifique el apriete de las tuercas hasta que se obtenga una estructura rígida. Logrado esto, la servóválvula ha sido ensamblada correctamente.

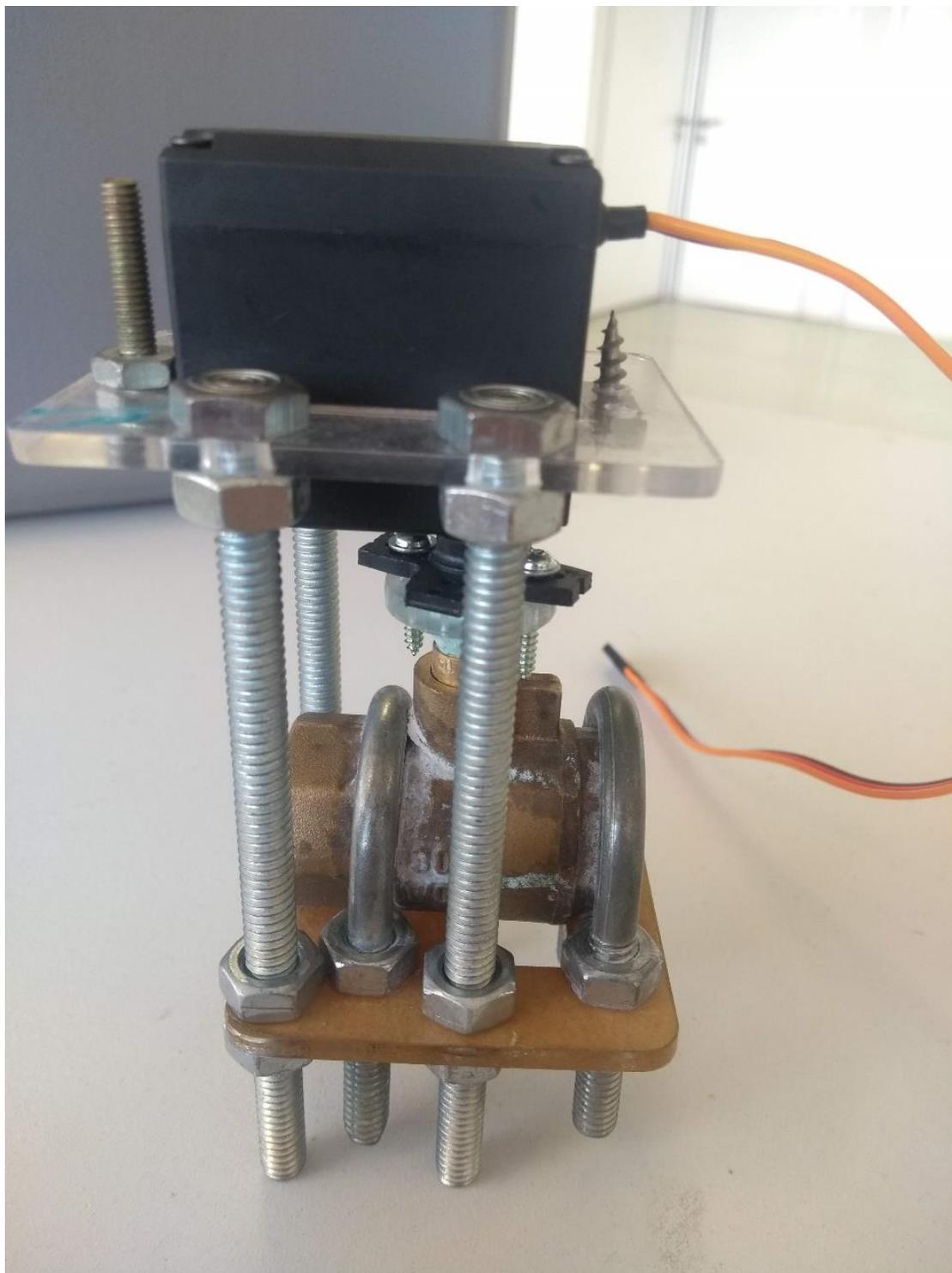


Fig. 92. Aspecto final de la servólvula.

6. Mejoras y adiciones.

6.1. Rediseño de piezas de la servoválvula.

Durante el desarrollo del banco de pruebas se identificó la servoválvula como uno de los elementos con mayor incidencia de problemas, del orden de X incidentes por cada 100 operaciones, a tal grado que era necesario interrumpir las actividades del banco durante varios días con el fin de corregir tales desperfectos.

Analizando el diseño de la servoválvula se detectaron los siguientes problemas:

- La servoválvula completa carecía de la rigidez suficiente para que el servo accionara la válvula sin impedimentos, este desperfecto agregaba movimientos indeseados en el conjunto.
- El proceso de armado de la servoválvula era muy tardado, difícil y con un gran margen de error. Sin incluir el tiempo de secado de la plastilina epóxica, una servoválvula se armaba en aproximadamente 8 horas.
- El diseño irregular del cuerpo de la válvula ocasionaba que ésta ejerciera presión excesiva sobre la pieza de acrílico inferior, ocasionando que dicha pieza se fracturara, o en su defecto, que la válvula presentara una inclinación considerable, reduciendo el área de contacto de la válvula con el soporte de acrílico. Estos problemas ocasionaban que la válvula presentara movimientos rotatorios en el mismo eje que la rotación del servo, disminuyendo la efectividad de éste.
- No se tenía definido un tipo de tornillo específico para asegurar el servomotor a la pieza de acrílico superior, tampoco se tenían barrenos para éstos, teniendo que hacerse de forma manual. Era necesario buscar en una bolsa con distintos tornillos de medidas y formas diversas uno que coincidiera en diámetro con alguna de las brocas del Dremel, con el orificio del servo y además conseguir su respectiva tuerca.
- Era necesario realizar manualmente los barrenos correspondientes a las abrazaderas en U en la pieza de acrílico inferior. Este proceso se dificultaba al tener en cuenta que no se tiene una broca para el taladro con ese diámetro, por lo que era necesario realizar estas 4 perforaciones con brocas más pequeñas, lo que hacía que dichos orificios no tuvieran una forma regular y, por tanto, en algunas ocasiones hubiera juego excesivo entre los elementos, impactando negativamente en la rigidez del conjunto. Además, no se tenía una posición específica donde colocar la válvula, haciendo muy engorrosa la tarea de determinar la posición de los barrenos.

- Las válvulas presentaron comportamientos anormales, se detectó que dichos elementos incrementaban su resistencia a la torsión con el aumento en los ciclos de trabajo, es decir, mientras más se usaba una válvula, mayor resistencia ejercía sobre el servo para cambiar su apertura.
- La conjunción de los problemas antes mencionados ocasionaba que el servomotor se viera expuesto a esfuerzos no considerados en su diseño, causando que éste dejara de funcionar. En el pico de incidentes, se llegó a cambiar de servomotor 3 ocasiones en menos de dos semanas.

Tras analizar distintas opciones, se llegó a la conclusión de que un rediseño en las piezas de acrílico ayudaría a mitigar gran parte de los problemas sin representar un cambio tan complicado, costoso y sobre todo por la gran rapidez con la que podían aplicarse estas modificaciones en el banco de pruebas.

Se comenzó con la pieza inferior, al ser la de mayor importancia para el diseño y la que acumulaba mayor número de oportunidades de mejora. Para el rediseño de esta pieza se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se alineó el eje de la válvula con el centro de la pieza.
- Con ayuda de un vernier se obtuvieron las medidas que permitieron posicionar los barrenos para las abrazaderas en U. Se adicionaron en total 4 barrenos para estas piezas.
- Se implementó un orificio para la protuberancia de la válvula, incrementando drásticamente el área de contacto de la válvula con el acrílico. De igual forma, este orificio permite posicionar fácilmente la válvula, mejorando el proceso de armado significativamente. Para esto se obtuvieron medidas del largo y ancho de esta deformidad y su posición respecto al eje de la válvula.
- Se reacomodaron ligeramente los barrenos anteriores, de tal forma que se aprovechó mejor el espacio disponible sin afectar la resistencia de la pieza, para esto siempre se trató de conservar o incrementar el espacio entre el barreno y las orillas u otros elementos del diseño. Con todo esto, se conservaron las dimensiones de la pieza.

A continuación, se muestra una comparativa entre el diseño anterior y la pieza modificada, señalando los elementos principales.

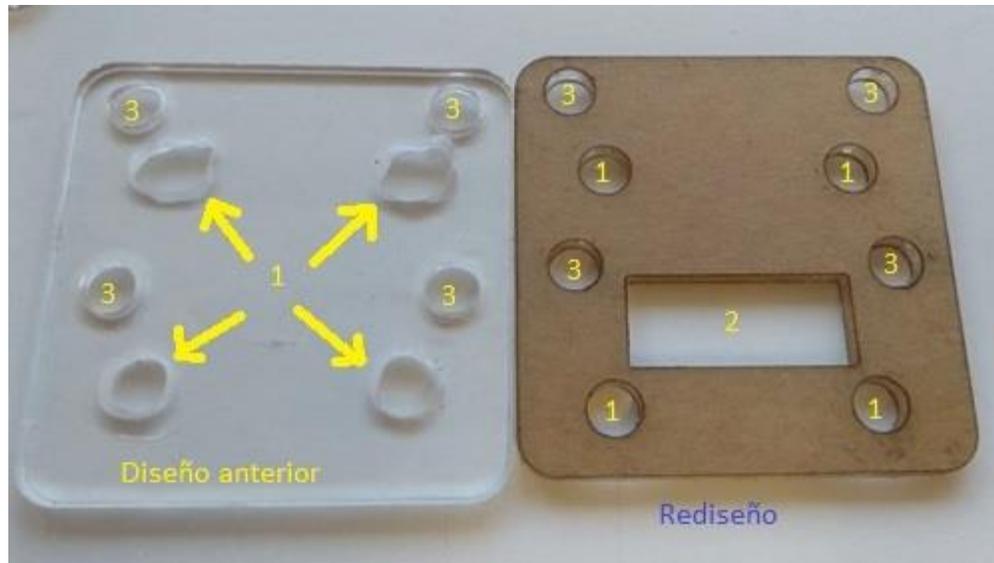


Fig. 93. Comparativa entre diseños de la pieza inferior.

1) Barrenos para las abrazaderas, 2) Orificio para la protuberancia, 3) Barrenos anteriores (para los pernos largos).

Para la pieza superior se consideró que, en su mayoría, el diseño era adecuado, por lo que se modificó ligeramente tomando en cuenta lo siguiente:

- Se definió el tornillo para acoplar el servomotor a la pieza superior: Tornillo métrico M4 -0.7 x 25 mm.
- En base a lo anterior, se obtuvieron las medidas necesarias para posicionar los barrenos correspondientes a estos tornillos. Se realizaron 4 barrenos, aunque solo se emplean dos, se hizo de esta forma para hacer coincidir con el diseño del servomotor.
- Se aumentó ligeramente el tamaño del orificio para el servomotor, de esta forma, se facilita el posicionamiento de éste y se evita dañar involuntariamente el cable.

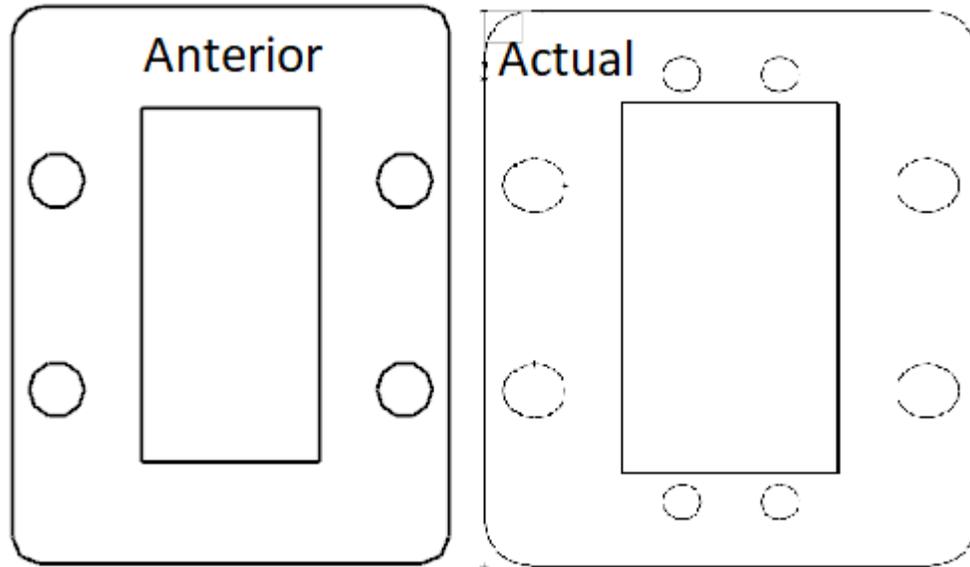


Fig. 94. Comparativa entre diseños de la pieza superior.

Adicionalmente se solicitó al proveedor realizar un cambio en el modelo de la válvula, esto con el fin de evitar el problema de endurecimiento de éstas, además se agregó lubricación, sin obtener resultados completamente favorables hasta el momento.

Gracias a estas modificaciones se logró:

- Incrementar la rigidez del conjunto y disminuir el juego entre los componentes, evitar movimientos indeseados.
- Disminuir el tiempo de armado de la servoválvula de 8 a 1.5 horas (sin tomar en cuenta el secado de la plastilina epóxica).
- Reducir la dificultad del armado de la servoválvula. Actualmente cualquier persona podría realizar el proceso.
- Estandarizar el proceso de armado de la servoválvula. A partir de ahora, todas las servoválvulas generadas con estos diseños serán iguales.
- Aumentar drásticamente el área de contacto de la válvula con el acrílico, se evitó la inclinación y se disminuyó la concentración de esfuerzos en la pieza.
- Estandarizar los elementos que componen la servoválvula. Definir las medidas de pernos y tornillos.
- Reducir la utilización de la herramienta rotatoria Dremel.
- Eliminar la necesidad de realizar perforaciones manuales.
- Reducir la incidencia de fallos, en 2 meses de operación con el nuevo diseño, solo se ha registrado un desperfecto relacionado con la servoválvula. En este tiempo de operación no ha sido necesario reemplazar algún servomotor.

6.2. Rediseño del circuito impreso.

Otro elemento que constantemente presentaba problemas es la placa de montaje superficial, tras analizar las posibles causas de los desperfectos, se identificaron los siguientes problemas:

- La ubicación de las terminales para conectar los sensores y el driver de los servomotores era muy cercana, lo que por cuestiones de espacio dificultaba la conexión y manipulación del cableado de éstos.
- Las terminales mencionadas anteriormente presentaban ruido, si bien en algunas ocasiones no imposibilitaban el funcionamiento del banco, si hacían que las mediciones no fueran completamente acertadas.
- Algunos de los pines destinadas al Arduino Uno no hacían contacto correctamente.
- La placa requería una conexión física, por cuestiones de diseño, una de las pistas se veía interrumpida para evitar corto circuito.

Adicionalmente, se detectaron otros problemas en el cableado:

- El cableado carecía de calidad. Se tenían problemas de conectividad y era poco estético.
- Exceso de cableado dificultaba la operación del banco de pruebas.
- No se tenía un código de color adecuado para facilitar la identificación de conectores y la sustitución de componentes.
- Algunos cables no tenían la longitud adecuada, impedían las labores de mantenimiento y solución de problemas.

Para el rediseño de la placa de montaje superficial se tomó en cuenta lo siguiente:

- Mayor separación entre conjuntos de terminales.
- Reubicación de pines en el arduino uno para evitar cortos circuitos y hacer más eficiente el arreglo de pistas.
- Mejora de la calidad de soldadura y cambio de terminales.
- Facilitar la colocación sobre la placa Arduino.

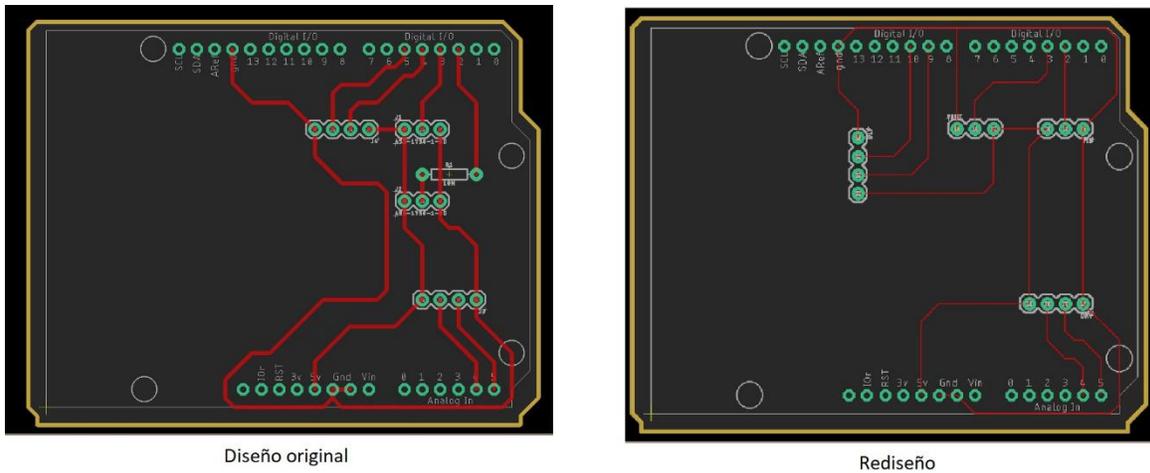


Fig. 95. Cambios en el diseño de la placa.

Además, se realizó la sustitución de todo el cableado del banco de pruebas utilizando cable UTP y colocando las terminales de los extremos de forma manual. Se implementó un código de colores para hacerlo coincidir, en la medida de lo posible con los cables provenientes de los sensores y servomotores.

Gracias a estas modificaciones se han disminuido los problemas de conectividad entre los sensores y la placa de montaje superficial.

Cabe mencionar que para implementar el rediseño de la placa de montaje superficial se tuvieron algunos inconvenientes con el proceso de fabricación, en un principio se optó por enviar el diseño con un proveedor para que éste se encargara de la manufactura automatizada, sin embargo, los resultados obtenidos fueron poco favorables, las placas presentaban exceso de cobre y esto dificultaba en gran medida la soldadura de las terminales a tal grado que se fabricaron 3 prototipos y ninguno de ellos pudo ponerse en operación debido a cortocircuitos entre distintas terminales.

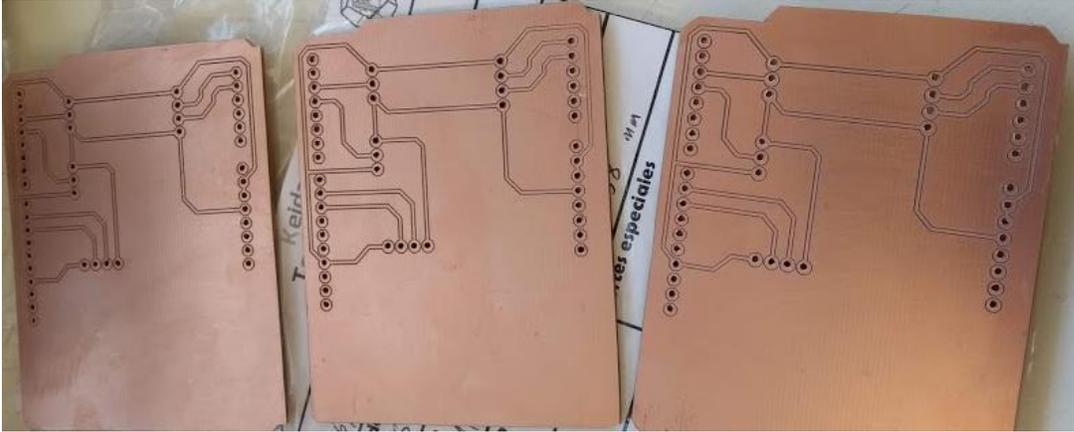


Fig. 96. Primeras piezas fabricadas.

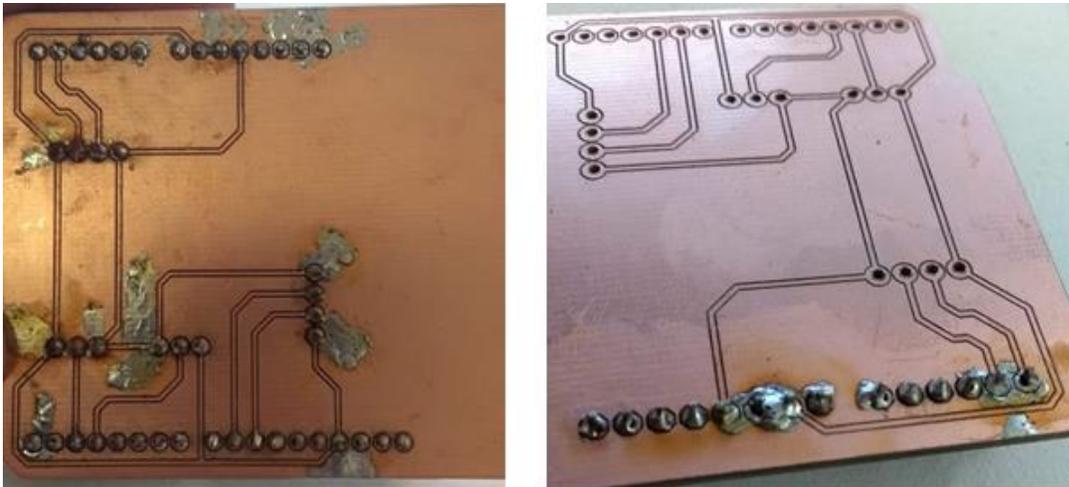


Fig. 97. Problemas con las soldaduras.

Tras estos inconvenientes se optó por realizar la manufactura del circuito de forma artesanal, con ello se redujo por completo la incidencia de cortocircuitos y se comprobó experimentalmente la efectividad de las mejoras implementadas.

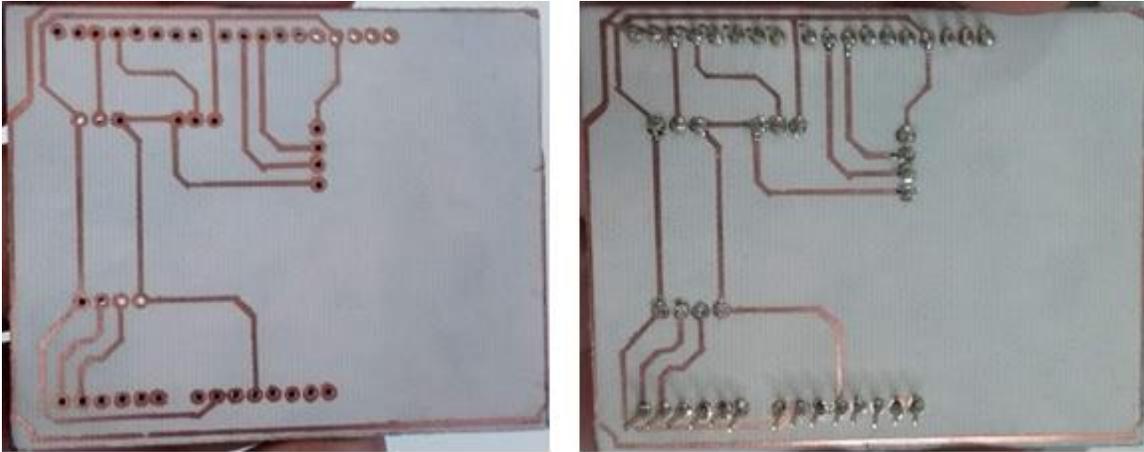


Fig. 98. Prototipo final de la placa.

6.3. Rediseño de la interfaz gráfica.

Como parte de las opciones de mejora propuestas por Said Pérez se mencionó la mejora de la interfaz gráfica para hacerla más amigable al usuario. Es por ello que se decidió modificar algunos de los elementos que componen la interfaz con los siguientes objetivos:

- Aprovechar mejor el espacio en pantalla.
- Agregar el modo de registro de datos "Log".
- Mejorar la visualización de los datos en las gráficas.
- Delimitar correctamente los distintos modos de la interfaz.

Con base en lo anterior se realizaron las siguientes modificaciones:

- Reacomodo y redimensionado de los elementos existentes.
- Aumento del tamaño de la ventana.
- Aumento de dimensiones de las gráficas.
- Adición de cuadro para indicar el nombre del archivo y botones para iniciar y finalizar el registro de datos.



Fig. 99. Comparativa entre versiones de la interfaz.

6.4. Refinamiento del código.

Al examinar el código fuente del programa se encontraron algunos problemas:

- Muchas etiquetas asignadas a variables tenían nombres poco adecuados, repetitivos y poco comprensibles, de tal forma que no era fácil identificar la función de cada variable ni diferenciarla respecto a otras con función similar.
- Grandes partes del código correspondían a comentarios, en su mayoría sentencias implementadas en iteraciones anteriores sin éxito, además no estaban bien delimitados respecto al código empleado en la actualidad.

- Algunas variables de vital importancia para el funcionamiento del programa no tenían un valor real, es decir, se habían asignado tomando en cuenta algunas estimaciones teóricas.
- Se tenían variables y secciones del código que no intervenían en el funcionamiento del banco o que no se usaban.
- Al seleccionar el puerto serie se incurría en una excepción y el programa se cerraba.

Con base en lo anterior, se realizaron las siguientes modificaciones:

- Re etiquetado de variables y métodos.
- Eliminación de variables y líneas de código no empleadas.
- Reducción de comentarios, eliminación de secciones de código obsoletas que se encontraban comentadas.
- Delimitación de secciones, se agregaron descripciones breves de la intención de cada método, clase, función, etc.
- Reprogramación de algunos botones, cuadros de texto y seleccionadores.
- Se corrigió el error en la selección del puerto serie.
- Se asignaron los valores de las variables T y Ks proporcionados por la facultad de química.
- Para evitar errores, se bloqueó la interacción con elementos estáticos de la interfaz.

También, por petición del profesorado se implementó un método para obtener un registro de los datos recibidos de los sensores de flujo y altura en tiempo real. Se tomaron en cuenta dos opciones, registrar los datos en una hoja de cálculo de Excel o en un documento de bloc de notas. Se eligió guardar los documentos en un bloc de notas por la menor carga de trabajo para el equipo de cómputo, cabe mencionar que al ejecutar el programa Visual Studio, el rendimiento de los equipos se ve afectado considerablemente, y la menor dificultad en la implementación del código. Cabe mencionar que se intentó implementar el código en una hoja de cálculo sin obtener resultados favorables ya que, para facilitar el proceso, sería necesario agregar más elementos a la interfaz que comprometerían la visualización del contenido, por tal motivo, se descartó esta opción.

La solución implementada para el registro de datos emplea un streaming de datos, desde que se reciben desde la placa arduino y se acumulan en 3 archivos, uno para los resultados de cada sensor, de esta forma, se obtienen archivos diferenciados con

los datos de cada sensor lo que permite su posterior utilización y análisis, además se incluye en la interfaz una caja de texto para asignar un nombre a un archivo y dos botones, inicio y fin, que permiten controlar el instante en el que se activa y desactiva la recepción y acumulación de datos.

6.5. Desarrollo del modo manual.

Otro de los requerimientos indicados por los profesores fue implementar un modo de operación que permitiera tener control pleno en la apertura de las válvulas de entrada y salida, para, a través de un conjunto de actividades establecidas, realizar la caracterización del banco de pruebas.

Para el desarrollo de esta modalidad, se definieron los siguientes lineamientos:

- El usuario podrá modificar la apertura de las válvulas en todo momento.
- Será imposible exceder la apertura máxima de las válvulas, esta condición será implementada por software.
- Se tendrá registro de las mediciones de todos los sensores, será posible su análisis en otro software como Excel.
- El usuario tendrá interacción en un espacio delimitado, por ejemplo, en una ventana o interfaz, no se permitirá alterar el código del programa. Se sugirió emplear un módulo de interacción externo.
- La recepción de datos se realizará en intervalos de tiempo considerables para evitar un exceso de información.

Tomando en cuenta lo anterior se elaboró la primera versión del programa. En un principio se tomó en cuenta el código de arduino para el control automático y un código empleado para dar mantenimiento a las servoválvulas como punto de partida para desarrollar esta modalidad. Esta versión consistió en un programa en Arduino donde la interacción con el usuario se realizaba a través de un módulo externo que constaba de dos potenciómetros, cuya función era emular el funcionamiento de unas perillas, y un circuito que permitía enviar la señal eléctrica correspondiente a la posición de dichos elementos, para posteriormente ser procesada y traducida a una apertura equivalente en la servoválvula, de tal forma que cada dos segundos se recibía información de los sensores y también de ambas perillas, si se detectaba un cambio en el valor correspondiente a alguna perilla, se realizaba el ajuste en la apertura de la servoválvula correspondiente. En el monitor serial de Arduino se podía observar la apertura de las servoválvulas en tiempo real, así como los datos obtenidos de los sensores de flujo y altura.



Fig. 100. Módulo de perillas implementado.



Fig. 101. Vista interior del módulo de perillas.

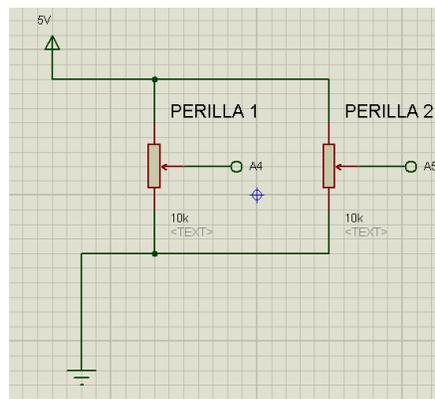


Fig. 102. Circuito esquemático del módulo de perillas.

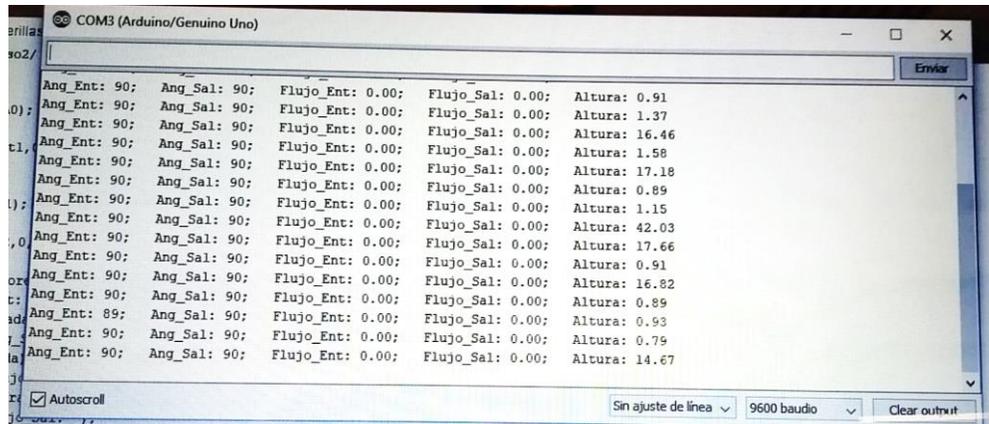


Fig. 103. Ejemplo de recolección de datos en esta versión.

En esta versión se detectaron los siguientes problemas:

- Las perillas, si bien hacían la operación más intuitiva, dificultaban un ajuste preciso en la posición de la servoválvula, es decir, era complicado obtener dos veces la misma apertura, además, el comportamiento inherente del potenciómetro hacía que la escala entre la posición "0" (abierto) y "90" (cerrado) no fuera homogénea, haciendo que en algunos intervalos las aperturas varíen más o menos rápido.
- En el monitor serial, las etiquetas "Ang_Ent", "Ang_Sal", "Flujo_Ent", "Flujo_Sal" y "Altura", si bien facilitaban la lectura de los datos, dificultaban su utilización y análisis en Excel.
- Se detectó un problema en el código correspondiente al sensor ultrasónico que ocasionaba que éste no recibiera el impulso eléctrico necesario para desarrollar su función y, por tanto, no se obtuviera una medición de la altura.

En consecuencia, se implementaron las siguientes modificaciones para la segunda versión:

- Se eliminó el módulo de perillas y se sustituyó por comandos en el monitor serial de la forma "A:BB", donde A representa el número de servoválvula que se desea controlar, 1 para la superior y 2 para la inferior, y los dígitos B representan la apertura en grados sexagesimales que se desea establecer en la servoválvula elegida.
- Se cambió el formato de los datos mostrados en el monitor serial a la forma: "VV,WW,XX.XX,YY.YY,ZZ.ZZ;" donde los dígitos V y W corresponden a la apertura en grados de la servoválvula superior e inferior, respectivamente, los dígitos X e Y se emplean para el valor de flujo, en litros por minuto, a la

entrada y salida, respectivamente y finalmente, los dígitos Z corresponden al valor de la altura de la columna de agua en centímetros. Esta modificación se adoptó para facilitar el análisis y procesamiento de datos en Excel, ya que empleando los separadores “,” y “;” es posible programar el programa para que al pegar el conjunto de datos automáticamente se distribuyan en columnas.

- Se modificó la programación del sensor ultrasónico asignando un mayor intervalo de tiempo para el envío de la señal “Trigger”, con esto, el problema fue resuelto.

Además, se agregó un nuevo requerimiento:

- El software debe permitir que se inicie, detenga y reinicie la recepción de datos, esto con el motivo de evitar mediciones innecesarias.

Para implementar esta última modificación se optó por incluir en la programación un arreglo de condiciones “if” en cascada, sin embargo, para permitir el funcionamiento de estas condiciones se decidió cambiar la sintaxis del comando empleado en el monitor serial de arduino de la siguiente forma:

- “I.”: Este comando inicia la comunicación serial y por tanto, la recepción de datos. Si se envía después de que la comunicación ha sido interrumpida por el usuario también permite reiniciar la recepción de datos.
- “I.A:BB”: El comando para establecer la apertura de una servoválvula se modificó ligeramente agregando el prefijo “I.”. El significado del resto de la sintaxis se conserva respecto a la versión anterior.
- “D.”: Este comando detiene la recepción de datos.

6.6. Implementación de prototipos y mantenimiento.

Durante el desarrollo de este trabajo se instrumentaron dos prototipos del banco de pruebas con el fin de ser utilizados para planear las actividades que conformarán los guiones experimentales que serán empleados en sus posteriores prácticas con alumnos.

El primer banco de pruebas se realizó siguiendo los procedimientos documentados por Said Ulises Pérez Sierra en su material de titulación. En esta primera iteración, los programas, diseños y materiales no sufrieron modificación alguna por lo que se podría considerar como el punto de partida para este proyecto. Como parte de las

actividades desempeñadas para la construcción de este dispositivo se realizó lo siguiente:

- Colocación e instrumentación de sensores de flujo y de altura.
- Elaboración de dos servoválvulas.
- Construcción del cableado para sensores y actuadores.
- Pruebas de operación con la interfaz gráfica y con el programa de control manual.

Cabe mencionar que el banco de pruebas se recibió con la placa de montaje superficial elaborada e instalada y el conjunto de driver y fuente de alimentación para los servomotores instrumentado.

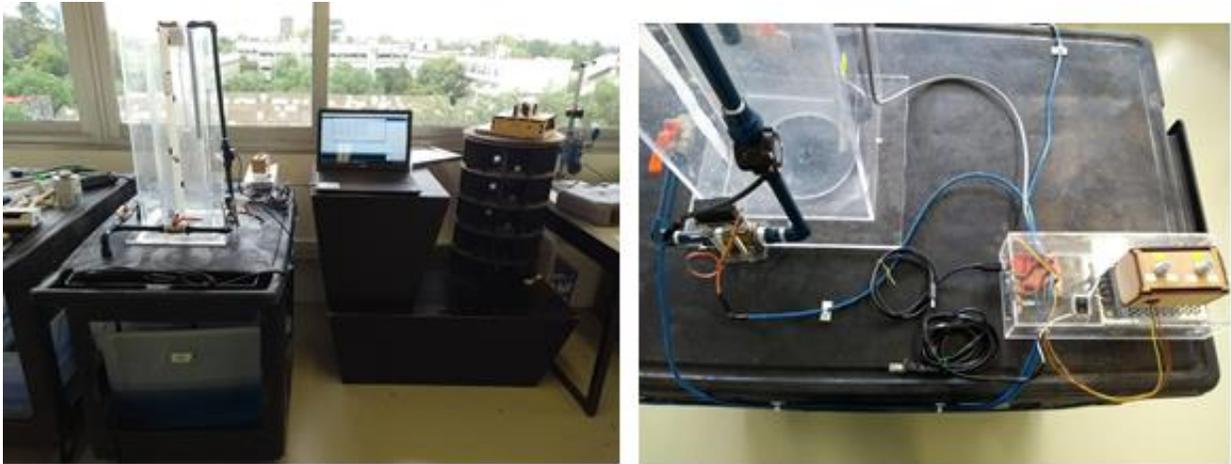


Fig. 104. Apariencia del primer banco de pruebas.

Tras unas semanas de operación el primer banco de pruebas presentó una serie de problemas que requirieron dar soporte técnico a algunos de sus componentes:

- El sensor de altura no realizaba la medición correspondiente. En consecuencia, se realizó una revisión exhaustiva de la circuitería y cableado, se encontraron pequeños cortos circuitos e interferencias en las conexiones asociadas a la cercanía entre terminales en la placa de montaje superficial y la mala calidad de algunos de estos elementos, estos inconvenientes se solucionaron en la medida de lo posible pero el problema persistió, a continuación, se revisó la programación y tras modificar el tiempo de exposición a la señal "Trigger" el problema fue solucionado.
- La servoválvula superior no abría por completo, se quedaba atascada o no respondía a las ordenes enviadas, además el servomotor se sobrecalentaba. Para esto se realizó en primer lugar una revisión del software y las conexiones,

fruto de esto se decidió cambiar el módulo de control por perillas por una interacción directa con el monitor serial del programa, se mejoró la operación haciendo más preciso el control, pero los problemas persistieron por lo que se inspeccionó el funcionamiento del Driver y de los servomotores, de esta forma se detectó que el servomotor no funcionaba correctamente y se sustituyó, se logró hacer funcionar la servoválvula durante aproximadamente una semana y posteriormente el problema persistió, por este motivo se decidió cambiar por completo la servoválvula, se construyó un conjunto con piezas completamente nuevas y el problema se solucionó parcialmente, afortunadamente, permitió que se desarrollaran algunas actividades con el banco de pruebas.

- El problema anterior se presentó poco tiempo después en la servoválvula inferior, se decidió cambiar por completo el conjunto de esta servoválvula logrando solucionar el problema temporalmente, para este momento, se había realizado la sustitución de 3 servomotores defectuosos y dos válvulas que presentaban problemas de endurecimiento.

Con esto, las actividades del primer banco de pruebas se vieron interrumpidas durante un lapso acumulado de aproximadamente un mes.

Tomando en cuenta la experiencia adquirida en las actividades de mantenimiento realizadas a partir de los incidentes mencionados anteriormente se decidió emprender las modificaciones al diseño enunciadas en el presente capítulo. Con estas adecuaciones se implementó el segundo banco de pruebas.

Hasta la finalización de este documento únicamente se han presentado dos problemas que en conjunto han implicado un tiempo de inactividad aproximado de 1 semana:

- Tras mes y medio de operación, se fracturó el cople del servomotor en ambas servoválvulas, tras una revisión se determinó que estas piezas fallaron a raíz de una acumulación de esfuerzo excesiva, hipótesis que se corroboró al intentar mover el eje de las válvulas e identificar que presentaban endurecimiento anormal, se decidió sustituir los coples y ajustar el ensamble de las servoválvulas, cabe mencionar que a dichas válvulas se les había aplicado spray lubricante "WD-40", dando resultados favorables instantáneamente pero persistiendo a largo plazo, se decidió retirar los residuos de este lubricante y aplicar un par sostenido al eje de la válvula hasta lograr reducir su oposición con el uso.

- El sensor ultrasónico para medición de altura dejó de enviar datos, tras realizar algunas pruebas se determinó que había dejado de funcionar y se sustituyó sin mayor contratiempo.

Con esto se corrobora que las modificaciones realizadas al diseño original han significado una mejora dramática en la incidencia de problemas que comprometan la operación del banco de pruebas.



Fig. 105. Apariencia del segundo banco de pruebas.

7. Observaciones y posibilidades de mejora.

Tras la observación durante varias sesiones de la interacción de profesores y alumnos con el banco de pruebas se llegó a lo siguiente:

- El usuario final del banco de pruebas no posee conocimientos de electrónica, por lo tanto, se pone a prueba la efectividad de los manuales para comunicar las acciones a realizar objetivamente. Esta situación fue tomada en cuenta para la redacción de dichos documentos, tratando de hacerlos explícitos, claros y simples en la medida de lo posible, resulta imposible dar detalles muy concretos sobre el funcionamiento de componente ya que implicaría un aumento considerable en la extensión de los documentos, haciéndolos poco prácticos, por lo que es de esperarse que algunos conceptos técnicos no abordados puedan dar lugar a confusión, sin embargo, se recomienda una búsqueda breve en internet para ayudar a disipar cualquier duda.
- Aunque como desarrolladores se quisiera evitar a toda costa la interacción del usuario con el código fuente de los programas o con el hardware del dispositivo, resulta totalmente imposible, los seres humanos por naturaleza somos curiosos, lo que implica interactuar con lo que no conocemos o es nuevo, tocar, manipular, experimentar, es parte de nuestro comportamiento y por tanto resulta ingenuo considerar que el usuario seguirá las recomendaciones expresadas respecto al cuidado que se debe tener al operar el equipo, es posible incluso que gracias a esta interacción se detecten problemas que no habían sido experimentados con anterioridad, por lo que se recomienda estar abiertos a realizar futuras modificaciones.
- El banco de pruebas fue diseñado con la finalidad de coadyuvar al aprendizaje de la materia "Laboratorio de Ingeniería Química IV" impartida en la facultad de Química de la UNAM y que equivaldría a las materias "Control automático", "Instrumentación" e "Instrumentación y control" de nuestra facultad. Es posible que al implementar este equipo en nuestro entorno se obtengan mejores resultados con el uso de los manuales aquí presentados por la familiaridad de los componentes con el alumnado, sin embargo, se debe tomar en cuenta que los conocimientos generados a partir de la experimentación con el equipo pueden extrapolarse para coadyuvar al aprendizaje de otras materias impartidas en la facultad como "Mecánica de fluidos", "Modelado de sistemas físicos", "Electrónica Básica", "Circuitos Digitales", entre muchas otras, se deja a consideración la generación de material didáctico para estos fines.

Gracias a la experiencia obtenida con la instrumentación, mantenimiento y modificación del banco de pruebas me permito sugerir algunas potenciales mejoras que podrían tomarse en cuenta a futuro:

- Examinar a fondo el problema de endurecimiento de las válvulas, proponer alternativas de solución y, si es posible, evaluar su sustitución por otro modelo o tipo de válvula, incluso la sustitución de los servomotores por modelos de mayor potencia que descarten la posibilidad de reincidencia. Es muy probable que una modificación de este tipo implique realizar cambios en el diseño en los componentes de la servoválvula, por lo que se recomienda tener en cuenta éste inconveniente.
- Evaluar modificar el material del cople del servomotor, actualmente se emplea la pieza de plástico incluida en los accesorios mismo, sin embargo, dicho elemento se ve sujeto a desgaste constante lo que disminuye su efectividad, se tiene constancia de que es posible encontrar en el mercado piezas similares fabricadas en aluminio, de tal forma que aumentaría su resistencia y, por tanto, su vida útil. Como punto negativo, se recomienda analizar si aumentar la resistencia de la pieza, evitando que ceda ante los esfuerzos, afectaría a otros componentes más costosos en caso de una falla, por ejemplo, al endurecerse la válvula.
- Integrar en la interfaz gráfica el modo de control manual desarrollado en este trabajo.
- De ser posible, implementar el registro de datos en Excel.
- Modificar la adhesión del cople de acrílico al eje de la válvula, actualmente se realiza con plastilina epóxica, pero esto representa una solución vulnerable al esfuerzo repetido y, por tanto, poco resistente, se sugiere intentar implementando elementos mecánicos como prisioneros o pasadores que mejoren la sujeción de la pieza sin necesidad de elementos adhesivos. Se puede considerar también cambiar el material con el que se fabrica dicho cople.
- Hacer que la interfaz gráfica se redimensione automáticamente para ocupar la pantalla completa sin importar la resolución del equipo de cómputo.
- Eliminar la dependencia del equipo a una computadora. Con los avances tecnológicos con los que se cuenta en la actualidad es posible desarrollar una nueva interfaz para microcomputadoras que permita desistir del uso de una laptop, además, el banco de pruebas cuenta con suficiente espacio para agregar más componentes.

8. Conclusiones.

Con el presente material se brinda un soporte escrito para la operación óptima del banco de pruebas, se sugieren actividades para propiciar el aprendizaje de las materias de instrumentación y control automático y, además, se proporciona orientación en las labores de mantenimiento y solución de problemas.

El manual del alumno presenta un enfoque orientado a brindar una herramienta accesible que permita poner en práctica los procedimientos para la puesta en marcha del banco de pruebas y además propicia la identificación de los componentes haciendo énfasis en las características y los principios de operación de cada uno de ellos. Considero que gracias a este manual se propicia que el alumno adquiera conocimientos de instrumentación a través de la interacción y el análisis de los componentes y las conexiones que integran el equipo, además al manipular los distintos modos de control es posible reconocer las diferencias y similitudes entre ellos e identificar la importancia de los distintos parámetros de control en el comportamiento del sistema.

En el manual del profesor se aborda desde una perspectiva técnica los sistemas que componen el banco de pruebas y su interacción entre sí, también se hace un recorrido por la interfaz de usuario haciendo énfasis en la configuración y operación segura de las modalidades de control, además, se brinda una serie de directivas para iniciar la operación del banco de pruebas y los procedimientos de seguridad para evitar hacer daño a los componentes de éste y finalmente se abordan los problemas más comunes y sus posibles alternativas de solución. De esta forma se le brinda herramientas al profesorado para ayudar en la resolución de dudas y contribuir a la disminución de riesgos y contención de posibles accidentes en la operación, también se busca escalar la solución de problemas del banco de pruebas propiciando que los profesores en conjunto con los alumnos den solución a las problemáticas más comunes y evitar con esto que se interrumpa el desarrollo de las clases.

Con la finalidad de poner en práctica los contenidos de los manuales anteriores y propiciar el aprendizaje de Control Automático se desarrolló el manual de prácticas, de esta forma, al realizar un conjunto de actividades definidas, el alumno podrá familiarizarse con la operación del módulo y aplicar los conocimientos adquiridos en clase para resolver las problemáticas planteadas, además podrá comprender las diferencias entre sistemas de control en lazo abierto y cerrado y la influencia de cada una de las constantes en el control PID.

Analizando la operación futura del módulo se llegó a la conclusión de que sería necesario realizar labores de mantenimiento y ensamble de nuevas servoválvulas, sin embargo, este proceso no estaba definido correctamente y sólo quienes participamos en el desarrollo del módulo podíamos realizarlo, por lo que, al ser el elemento más importante del banco y cuya operación determina el éxito o fracaso del control, se considera de vital importancia establecer una metodología clara para realizar este proceso, es por ello que se decidió desarrollar el manual de armado de la servoválvula, gracias a esto, es posible que en el futuro cualquier persona pueda ensamblar y sustituir componentes de la servoválvula, reduciendo así los tiempos de inactividad del banco y facilitando el entrenamiento del personal de mantenimiento que se integre posteriormente al equipo de desarrolladores.

Gracias a las modificaciones implementadas durante la realización de este documento ha sido posible disminuir la incidencia de problemas en el banco de pruebas, logrando eficientar la operación de éste al reducir el tiempo de inactividad. Con ello, se espera que cada vez sea menos común la interrupción de las actividades debido a problemas de fiabilidad del módulo experimental, contribuyendo de esta forma a un proceso de aprendizaje más efectivo.

Considero que, a pesar de las mejoras implementadas, queda gran margen de mejora, exhorto a los futuros participantes de este proyecto a enfocar sus esfuerzos en reducir aún más la incidencia de problemas e implementar nuevas modificaciones que faciliten los procesos de ensamblaje y mantenimiento y mejoren el procesamiento de la información recabada en pro de contribuir a la formación integral del alumno.

Durante el desarrollo de este documento tuve la oportunidad de observar y ser partícipe del proceso de enseñanza de la teoría de control en la facultad de Química, por ejemplo, constaté la existencia de materias completamente teóricas y completamente prácticas, este proyecto nace de la necesidad de brindar un soporte práctico para una materia enteramente teórica como lo es "Dinámica y control de procesos", además confirmé la gran rigurosidad que se tiene en el desarrollo de actividades experimentales, así como la importancia de comparar los resultados con los cálculos realizados,

Gracias a esto he podido contrastar esta experiencia con lo realizado durante mi formación en la facultad de ingeniería y llegué a la conclusión de que existen grandes diferencias en la forma en la que se imparten estas materias producto de los distintos

enfoques de cada carrera, sin embargo, considero que es posible tomar esta experiencia para enriquecer el proceso de enseñanza aprendizaje en nuestra facultad. En la actualidad, en la facultad de ingeniería no se cuenta con un ejemplar del banco de pruebas para apoyar las actividades de formación del alumnado, considero que sería importante desarrollar una variante de este proyecto diseñada para permitir que los alumnos de nuestra facultad puedan reforzar los conocimientos obtenidos en materias como "Instrumentación", "Instrumentación y control" y "Control automático" y que a su vez permita un enfoque más técnico y con mayor interacción con los componentes del banco de pruebas, pienso que esto enriquecería el proceso de enseñanza y mejoraría los resultados de éste.

9. Glosario.

Término	Significado
Bypass	Derivación, desviación.
CA	Corriente alterna.
COM	Puerto serial.
Driver	Controlador.
Interfaz	Zona de comunicación o acción de un sistema sobre otro.
Kd	Constante derivativa.
Ki	Constante integral.
Kp	Constante proporcional.
Log	Registro.
PC	Computadora personal.
PID	Controlador proporcional, integral y derivativo.
PWM	Modulación por ancho de pulsos.
Reset	Reinicio.
SV	Servoválvula.
Ultrasónico	Vibración mecánica de frecuencia superior a las que puede percibir el oído.
USB	“Universal Serial Bus” Bus universal en serie.