



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Diseño y construcción de un banco hidráulico de pruebas

Benjamín Valera Orozco
Juan Salvador Pérez Lomeli
Enrique Soto Castruita
Eduardo Bernal Vargas

Noviembre 2014

Proyecto PAPIME: Diseño e instrumentación de un banco hidráulico de pruebas para determinar caídas de presión en accesorios y tuberías

Clave del proyecto: PE103413

Diseño y construcción de un banco hidráulico de pruebas

Benjamín Valera Orozco, Juan Salvador Pérez Lomeli, Enrique Soto Castruita y Eduardo Bernal Vargas

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, C.P. 04510, México D.F. México

Resumen

Un banco hidráulico de pruebas con fines didácticos, como ejemplo, permite a los estudiantes determinar pérdidas de presión en tuberías y accesorios, como parte de la materia de Mecánica de Fluidos I que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El objetivo del presente proyecto es desarrollar un banco hidráulico que incorpore elementos adicionales con relación a los que posee actualmente el banco del Laboratorio de Mecánica de Fluidos. El equipo desarrollado tiene la flexibilidad de intercambiar los sensores de medición, para facilitar el levantamiento de lecturas de presión y velocidad de flujo por medios computacionales. Adicionalmente, con el desarrollo del presente proyecto, se busca despertar el interés de los alumnos por los recursos modernos que existen en computación e instrumentación en el área de hidráulica. Con este propósito, se desarrolló un banco hidráulico de pruebas que contempla la adquisición de datos de presión y velocidad de flujo, control de una electroválvula proporcional y área de visualización de fluidos. Además, se desarrolló el software de operación para PC bajo un ambiente amigable para el estudiante que manipulará el equipo. En el presente informe se reporta el diseño y construcción del banco hidráulico, su sistema electrónico, su tablero para el circuito hidráulico y el desarrollo del software de operación, tareas realizadas durante dos años. El sistema electrónico tiene como base un microcontrolador PIC18F4553 que permite registrar la caída de presión y velocidad del flujo en el circuito hidráulico por medio de un sistema de adquisición de datos. Por otra parte, el mismo sistema electrónico permite la variación del caudal del fluido que circula al manipular una electroválvula de apertura proporcional en conjunto con una bomba sumergible. El tablero es un circuito hidráulico conteniendo los dispositivos que controlan la circulación del fluido y los diversos accesorios que son analizados como parte de la materia mencionada. La interface de usuario consiste de un software para computadora desarrollado específicamente para la presente aplicación. En éste software, el alumno podrá controlar y registrar las variables involucradas en las tres prácticas anexas elaboradas para el Laboratorio de Mecánica de Fluidos I. En el desarrollo del banco hidráulico se utilizaron herramientas de desarrollo básicas que facilitan la transferencia de la tecnología. Se reportan los resultados obtenidos al utilizar el banco hidráulico para realizar las tres prácticas del laboratorio mencionado. Estos resultados nos indican la factibilidad de su uso como parte de la materia de Mecánica de Fluidos I.

Indice

Introducción	4
Definición del problema	4
Entorno actual	4
Descripción del problema a resolver y motivación	4
Relevancia y limitaciones	4
Relación con otras áreas	5
Método	5
Objetivos y resultados esperados	6
Organización del informe	6
1 Descripción del banco hidráulico de pruebas	7
1.1 Esquema general	7
1.2 Sistema electrónico	8
1.2.1 Acondicionamiento de señales de presión	8
1.2.2 Acondicionamiento de señal de flujo	10
1.2.3 Etapa de potencia para la bomba hidráulica	11
1.2.4 Etapa de potencia para la electroválvula	12
1.2.5 Acondicionamiento de la señal de posición de la electroválvula	12
1.2.6 Etapa de control y comunicación	13
1.2.7 Firmware del microcontrolador	14
1.2.8 Etapa de alimentación	17
1.3 Tablero hidráulico y accesorios mecánicos	18
1.3.1 Tablero y estructuras de soporte	18
1.3.2 Carcasa	20
1.3.3 Depósito de agua	21
2 Descripción del software de operación	22
2.1 Procedimiento de instalación	22
2.1.1 Requisitos mínimos	22
2.1.2 Instalación del software	22
2.2 Descripción del software en el ámbito del operador	23
2.3 Descripción del software en el ámbito del programador	24
2.3.1 Clase CAnalogCtrl	25
2.3.2 Clase CNTgraphctrl1	26
2.3.3 Clase CProgressU	26
2.3.4 Clase CRoundSliderCtrl	27
2.3.5 Clase CVisualApp	29
2.3.6 Clase CVisualDlg	29
2.3.7 Clase CAboutDlg	33
2.4 Procedimiento típico para operar el sistema	34
3 Resultados y discusión	35
3.1 Resultados	35
3.1.1 Sistema electrónico	35
3.1.2 Tablero hidráulico	36
3.1.3 Software de operación	37
3.1.4 Calibración	37
3.1.5 Experimento del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	44
3.2 Discusión	45
3.3 Trabajo a futuro	46

Conclusiones	47
Anexo A Sistema electrónico	48
A.1 Diagrama esquemático	48
A.2 Circuito impreso	50
A.3 Lista de partes	53
Anexo B Tablero hidráulico	56
B.1 Planos de construcción	56
B.2 Lista de partes	60
Anexo C Prácticas de Laboratorio	63
Práctica 1 Pérdidas en tuberías	64
Práctica 2 Pérdidas en accesorios	67
Práctica 3 Pérdidas en válvula de globo	69
Anexo D Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas	72
D.1 Descripción del banco hidráulico de pruebas	72
D.2 Purga de aire	73
D.2.1 Objetivo	73
D.2.2 Desarrollo	73
D.3 Procedimiento típico para operar el banco hidráulico de pruebas	75
D.3.1 Objetivo	75
D.3.2 Desarrollo	75
Referencias	77

Introducción

El desarrollo de los sistemas electrónicos para la adquisición de datos y las modernas computadoras permite hoy en día la solución y simulación de muchos problemas en mecánica de fluidos. En realidad, una gran parte de los problemas sólo tienen solución experimental. Un procedimiento típico para evaluar un sistema hidráulico consiste de los siguientes elementos:

- Construir un prototipo en tamaño real o a escala.
- Definir las variables de interés.
- Analizar el desempeño de las variables para diferentes condiciones experimentales.

Con este enfoque se analizan, en los laboratorios de hidráulica, las pérdidas de energía en conductos cerrados. El enfoque ha demostrado gran utilidad en la enseñanza de la mecánica de fluidos a nivel licenciatura.

La utilización de un equipo instrumentado para identificar la principales variables involucradas en el diseño de redes hidráulicas de manera clara, mejora la comprensión del tema y permite que los alumnos apliquen estos conocimientos de manera eficiente durante su desarrollo profesional, todo esto apoyado en la comparación con resultados y tablas disponibles en la literatura que reforzarán la confianza de los estudiantes y profesores en los métodos y técnicas utilizadas en el laboratorio.

Definición del problema

En este trabajo se plantea el problema de diseñar y construir un banco de pruebas hidráulicas instrumentado con los enfoques modernos de instrumentación computacional o virtual que existen actualmente en el área de ingeniería hidráulica.

Entorno actual

El principal antecedente para el desarrollo del presente proyecto es el equipo Armfield Fluid Friction Apparatus, instalado actualmente en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería UNAM. Mediante este equipo se estudia la fricción de fluidos incompresibles y pérdidas secundarias que ocurren a través de tuberías y accesorios. El equipo se ha utilizado como parte fundamental de las prácticas 7, 8 y 9 en la materia de Mecánica de Fluidos I. La experiencia adquirida en el manejo del equipo por parte de los académicos, nos conduce a proponer mejoras en la infraestructura actual y nuevos experimentos para la enseñanza y aprendizaje de la materia con base en instrumentación moderna.

Descripción del problema a resolver y motivación

La experiencia adquirida por parte de la planta académica de la materia de Mecánica de Fluidos I nos motiva a desarrollar un banco hidráulico de pruebas que incorpore elementos de adquisición de datos con base en los recursos de cómputo e instrumentación actuales. En este sentido, se desea construir un sistema para el análisis de pérdidas en fluidos que registre las caídas de presión y controle el gasto del fluido desde una computadora personal con software de desarrollo propio específico para que el alumno desarrolle sus prácticas de manera amigable.

Relevancia y limitaciones

La relevancia del proyecto radica en dos aspectos que la planta académica en la materia ha identificado como elementos que enriquecen el desarrollo de los futuros profesionistas del área. En primer lugar motivar al alumno en el uso de recursos modernos de instrumentación y programación de computadoras aplicados en el área de mecánica de fluidos. En segundo lugar el sistema propuesto servirá como plataforma de desarrollo para futuras aplicaciones y para apoyar la creación de infraestructura de desarrollo propio que puede ser ofrecida como una transferencia tecnológica.

El alcance del presente proyecto es la obtención del conocimiento elemental y el desarrollo de una plataforma hardware y software básica que sea utilizada en la enseñanza de la hidrodinámica en canales confinados.

Las limitaciones del prototipo por desarrollar radican en lo elemental de su principio de operación. Sin embargo, constituye un elemento valioso en el momento de transmitir el conocimiento básico que puede ser utilizado en aplicaciones futuras a partir de una herramienta básica.

Relación con otras áreas

Existe una gran relación con las áreas de mecánica de fluidos, instrumentación virtual, programación de computadoras y medición e instrumentación.

Método

En este proyecto se propone diseñar y construir un banco de pruebas hidráulico que registre la caída de presión, en diversos accesorios, por medio de un sistema de adquisición de datos, que permita la variación del caudal del fluido que circula por los accesorios y que cuente con elementos para la visualización de las variables. El esquema general se presenta en la figura 1.

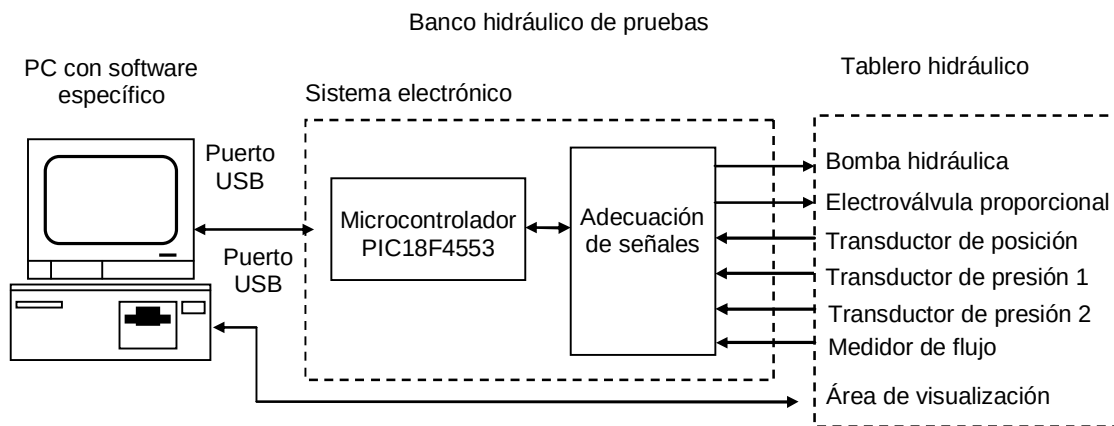


Figura 1. Método a emplear.

En el esquema de la figura 1 una PC con software de desarrollo específico para esta aplicación realiza las siguientes tareas.

- Registra las caídas de presión en los transductores 1 y 2 que son conectados al circuito hidráulico sobre los accesorios del tablero.
- Controla el encendido y apagado de una bomba hidráulica sumergible que impulsa la circulación del fluido por los diversos accesorios del tablero.
- Controla el gasto del flujo que circula por el tablero hidráulico al estrangular el paso del fluido por medio de una electroválvula de control proporcional.
- Registra el porcentaje de apertura de la electroválvula al medir su posición.
- Registra el flujo que circula en el circuito hidráulico por medio de un medidor de caudal.
- Mediante una cámara del tipo WebCam, presenta la imagen de la circulación del fluido que atraviesa una sección transparente de tubería del tablero hidráulico.

En este esquema, la computadora ejecuta la interface con el usuario y se comunica mediante conexión USB con el sistema electrónico y WebCam para controlar y registrar las variables en el tablero hidráulico.

El tablero hidráulico en esencia es un circuito hidráulico de retorno de fluido en el cual se distribuyen diversos accesorios hidráulicos como codos, tes, y griegas, y válvulas que cuentan con conectores

hidráulicos rápidos a los cuales se adaptan fácilmente los transductores de presión. Conforme al desarrollo de las prácticas, los transductores de presión se conectan al accesorio en cuestión y se varía el caudal del fluido. De esta manera se grafican las caídas de presión en función del caudal. El tablero tiene un área de visualización de fluidos en donde, a través de una cámara WEB, el alumno puede observar los diversos regímenes del fluido.

Objetivos y resultados esperados

Objetivo general: Diseñar y construir un banco hidráulico de pruebas con fines didácticos.

Como parte del objetivo general, se tienen los siguientes objetivos específicos y resultados esperados:

- Diseñar y construir un sistema electrónico para la adquisición de datos, control de dispositivos electromecánicos y comunicación USB con una PC.
- Diseñar y construir un tablero hidráulico de pruebas que contenga los accesorios necesarios para analizar fluidos en canales confinados.
- Desarrollar el software de operación para PC que ejecuta la interface con el usuario.

Organización del informe

En la sección 1 se describen los dos bloques básicos del banco hidráulico: sistema electrónico y tablero hidráulico. Mención aparte requiere el desarrollo de la interface de operación. En la sección 2 se describe el software de operación en los ámbitos del usuario y del programador. Se proporciona una guía típica para operar el sistema desarrollado. En la sección 3 se muestra el funcionamiento del sistema bajo pruebas de desempeño y calibración, se discuten los resultados obtenidos y se establece el trabajo a futuro. En las conclusiones se expone el trabajo realizado en este proyecto. En el anexo A se muestran los detalles de la implementación del sistema electrónico. El anexo B muestra los detalles de fabricación del tablero hidráulico. El anexo C contiene la propuesta de prácticas a realizar con el banco desarrollado incluyendo resultados típicos de pruebas reales. El anexo D contiene la guía de instalación inicial del banco desarrollado. En las referencias, se lista la bibliografía usada para la elaboración de este trabajo. Se incluye un CD conteniendo la siguiente estructura de directorios.

Informe
CodigoFuente
 PIC
 VisualC
Programa
 Instalacion
 Manejadores
CADElectronica
CADTablero
Prácticas

El contenido de los directorios es como sigue:

Informe: El presente documento.

CodigoFuente: El código fuente de los programas desarrollados para el sistema electrónico y PC.

Programa: Los archivos de instalación y manejadores del programa desarrollado para PC.

CADElectronica: Los archivos CAD para la construcción del sistema electrónico.

CADTablero: Los archivos CAD del tablero hidráulico.

Practicas: Contiene los documentos Word de las prácticas propuestas y hojas de cálculo con mediciones reales.

1 Descripción del banco hidráulico de pruebas

El proyecto consiste en desarrollar un banco hidráulico que permita la adquisición de datos, el control de caudal y la operación del equipo desde una computadora usando el sistema operativo Microsoft Windows.

1.1 Esquema general

La figura 2 muestra el esquema general para el banco hidráulico de pruebas. Se tiene un sistema electrónico que registra datos de los transductores de presión, flujo y posición; controla el funcionamiento de una bomba hidráulica y de una electroválvula. El tablero hidráulico proporciona el soporte para los dispositivos electromecánicos, los diversos accesorios del circuito hidráulico y los conectores rápidos para conectar los transductores de presión. El tablero cuenta con un sección transparente de tubería con fines de visualización de fluidos por medio de una WebCam. Además, se reciben y envían datos hacia una computadora, la cual cuenta con el software de operación elaborado específicamente para éste proyecto.

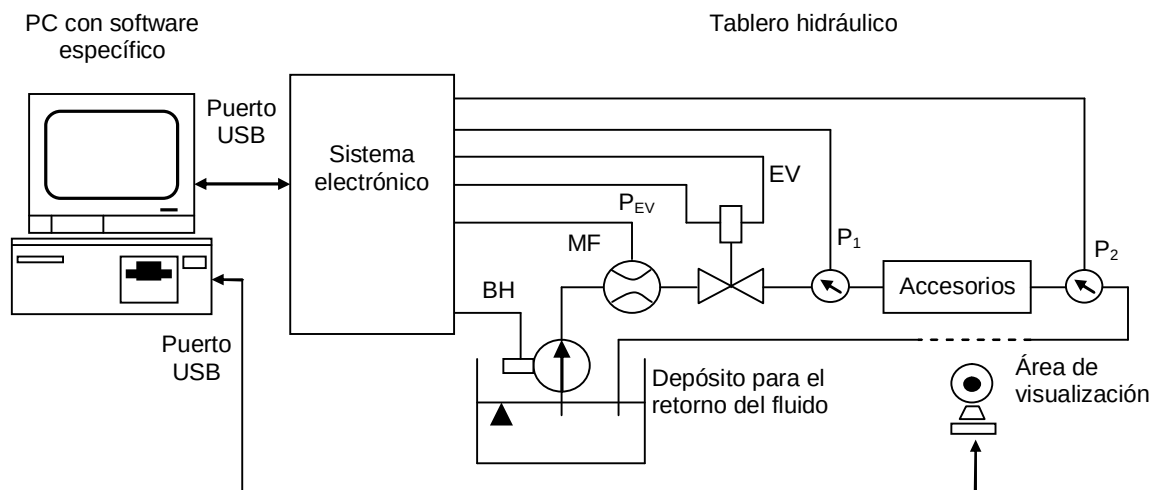


Figura 2. Esquema general.

En el esquema de la figura 2 el sistema electrónico genera las señales de salida para impulsar las siguientes cargas en el tablero hidráulico:

- La bomba hidráulica, BH, que impulsa el fluido (agua limpia) en el circuito del tablero hidráulico.
- La electroválvula, EV, que estrangula de forma controlada el fluido para regular el caudal en el circuito hidráulico del tablero.

Por otra parte, el sistema electrónico digitaliza las siguientes variables para su registro:

- La presión diferencial P_1 y P_2 sobre conectores rápidos en el circuito hidráulico para determinar las caídas de presión en diferentes accesorios.
- La medición de flujo, MF, para determinar el caudal que circula en el circuito hidráulico.
- La posición de la electroválvula, P_{EV} , para registrar el porcentaje de apertura en la electroválvula.

Los parámetros anteriores son generados y registrados mediante el circuito electrónico y transportados hacia la computadora mediante la conexión USB. De esta forma, en la computadora se pueden levantar lecturas del banco hidráulico de acuerdo a los desarrollos de las diferentes prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Adicionalmente, el tablero hidráulico cuenta con una sección transparente de tubería destinada para la visualización de los diferentes regímenes del fluido. En esta área de visualización se coloca una cámara WEB la cual se conecta a la PC para el registro de las imágenes.

Bajo el esquema de la figura 2 se pueden llevar a cabo una gran cantidad de experimentos ya que el sistema es susceptible de ser controlado por una PC y automatizar los procesos de medición.

A continuación, una descripción detallada del sistema electrónico.

1.2 Sistema electrónico

En esta sección se describen los detalles del sistema electrónico de la figura 2. En la figura 3 se presenta un diagrama a bloques general del sistema electrónico.

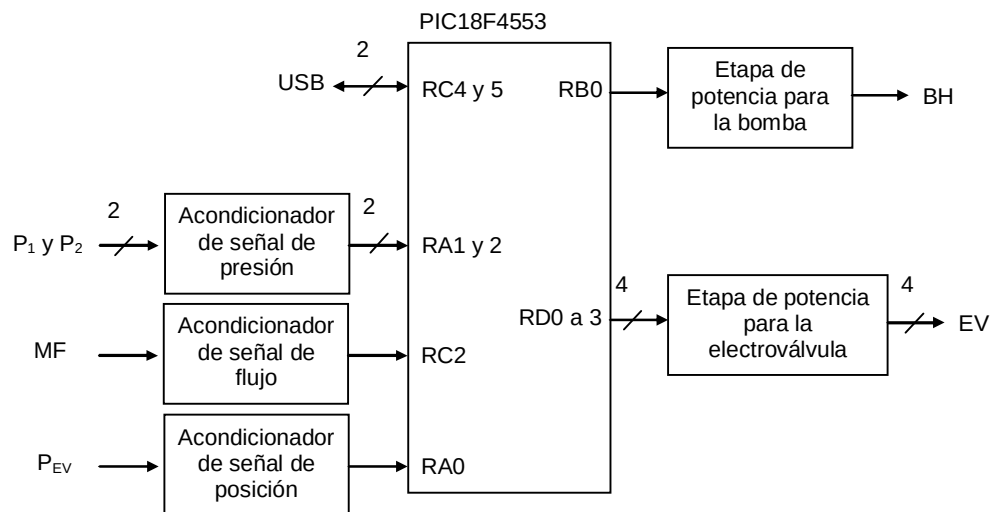


Figura 3: Esquema general del sistema electrónico.

Para consultar los detalles de la implementación, refiérase al anexo A y a los archivos de la carpeta CADElectronica del CD anexo. A continuación, una descripción de los diversos subsistemas del sistema electrónico desarrollado.

1.2.1 Acondicionamiento de señales de presión

Se emplearon transductores de presión modelo PX26-015DV de ± 15 (psid) para P_1 y PX26-030DV de ± 30 (psid) para P_2 , fabricados por Omega. Dichos sensores son dispositivos activos con cuatro elementos piezorresistivos en un arreglo de puente de Wheatstone. De acuerdo al fabricante, estos sensores poseen una sensibilidad de 10 (mV/V); una no linealidad de 1% en la escala completa y una desviación en la repetitividad del 0.2% [Omega Engineering Inc., sin fecha-a].

El módulo de Conversión Analógico a Digital de 12 bits, CAD, del PIC18F4553 acepta señales entre 0 y 5 (V), por lo que el voltaje proporcional a la presión diferencial tiene que estar entre esos límites. La figura 4 muestra el circuito básico para adecuar la señal de presión a la entrada del CAD.

El funcionamiento de los sensores P_1 y P_2 es similar; la única diferencia es la presión diferencial a la que pueden ser sometidos, por lo que se usa un circuito como el de la figura 4 para cada uno de ellos.

De la figura 4, U5 representa el sensor de presión PX26-015DV del cual se obtiene la señal diferencial V_O .

El voltaje V_O máximo está dado por la ecuación del fabricante

$$V_{O\text{maximo}} = \text{Voltaje de polarización} * \text{Sensibilidad}$$

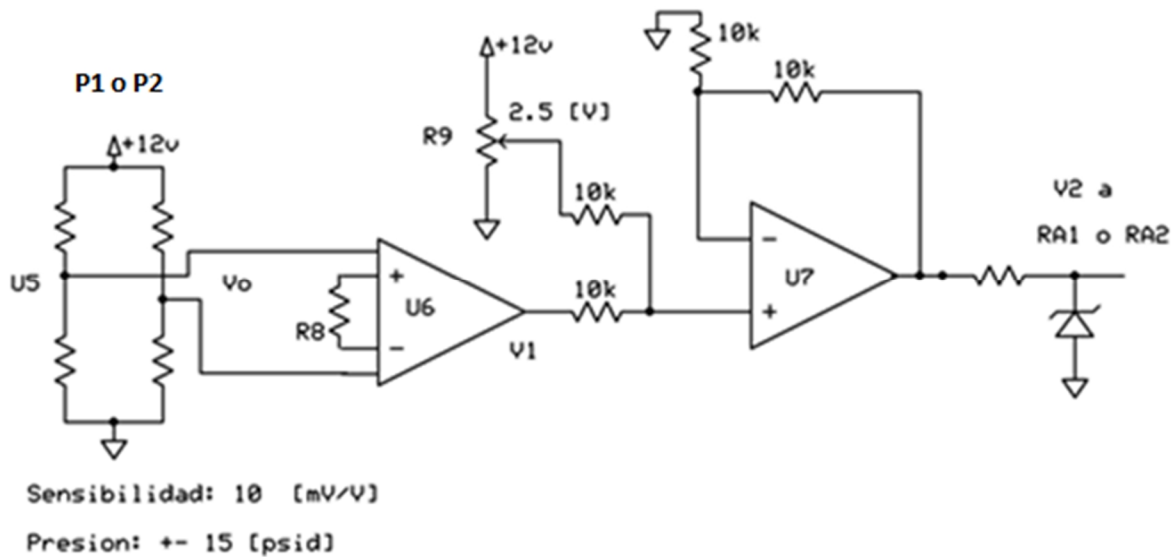


Figura 4. Acondicionamiento de señal de presión.

Como se aprecia en la figura 4, el voltaje de polarización del sensor es 12(V) por lo que:

$$V_{O\text{maximo}} = 12(\text{V}) \times 10 \left(\frac{\text{mV}}{\text{V}} \right) = 120(\text{mV}) \quad (1)$$

Por lo tanto, $V_O = \pm 120(\text{mV})$ para ± 15 (psid).

Para realizar el acondicionamiento se amplifica a V_O para obtener $V1$ con ayuda de U6, el cual es un amplificador de instrumentación y se agrega un offset de 2.5 (V) a $V1$ para obtener $V2$ usando a U7 como amplificador sumador. Este proceso se visualiza en la figura 5, donde se grafica el voltaje a la salida de U6, $V1$, con respecto a la presión aplicada y en la figura 6 en donde se grafica el voltaje a la salida de U7, $V2$, con respecto al voltaje a la salida de U6, $V1$.

La ecuación (2) corresponde a la ganancia del amplificador de instrumentación AD620 [Analog Devices, sin fecha].

$$\frac{V1}{V_O} = \frac{49.4(\text{k}\Omega)}{R8} + 1 \quad (2)$$

Si $V_O = \pm 0.120$ (V) $V1 = \pm 2.5$ (V), por lo tanto la ecuación (2) se expresa en la forma de la ecuación (3)

$$R8 = \frac{49.4(k\Omega)}{\frac{V1}{Vo} - 1} = \frac{49.4(k\Omega)}{\frac{2.5}{0.12} - 1} = 2.49(k\Omega) \quad (3)$$

Para obtener el comportamiento descrito en la figura 6, se emplea un amplificador sumador no inversor. Como los resistores usados son iguales, la expresión para la señal de salida se reduce a la suma de las señales de entrada, por lo que, el voltaje V2 es como se muestra en la ecuación (4)

$$V2 = 2.5 + V1 \quad (4)$$

Finalmente, se emplea un diodo Zener para garantizar que el nivel de voltaje proporcional a la presión diferencial ejercida en el sensor no exceda los 5(V) del canal de entrada al microcontrolador.

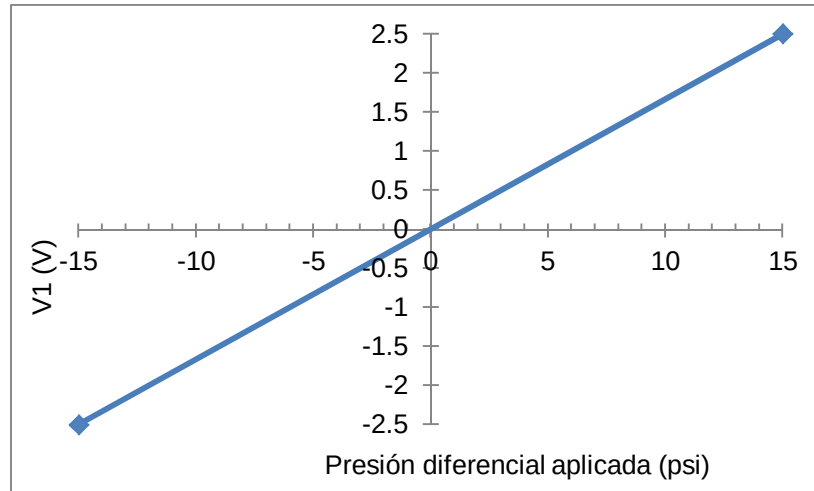


Figura 5. Función característica del amplificador diferencial, U6.

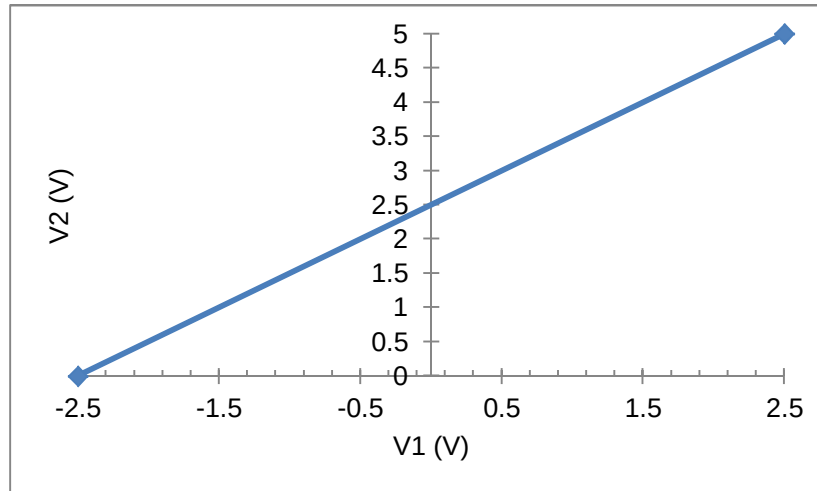


Figura 6. Función característica del amplificador sumador, U7.

1.2.2 Acondicionamiento de señal de flujo

El sensor de flujo empleado es el FP-5300 de Omega [Omega Engineering Inc., sin fecha-b]. Éste es un sensor de flujo a paletas que puede registrar desde 0.3 hasta 6 (m/s). Posee una no linealidad de $\pm 1\%$ en la escala completa, así como una desviación en la repetitividad de $\pm 0.5\%$ en la escala completa. La

salida de este dispositivo tiene una frecuencia de 6 (Hz) por cada 1 (pie/s) o 19.685 (Hz) por cada 1 (m/s) y una amplitud de 3.3 (V_{pp}) por cada 1 (m/s).

El parámetro de interés es la frecuencia de la señal generada por el sensor de flujo, V1. Para poder contabilizar esta frecuencia en el módulo de Captura/Comparación/PWM (CCP) del microcontrolador en RC2, se requiere convertir la señal sinusoidal del sensor a una señal cuadrada entre 0 y 5 (V), V2. Esta operación se consigue con el circuito acondicionador de la figura 7. La función característica del circuito de la figura 7 se muestra en la figura 8. El comparador empleado U4 es un LM311. El resistor R34 es usado como pull-up, debido a que la salida de este comparador es de colector abierto.

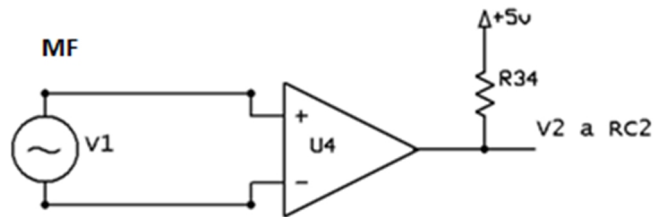


Figura 7. Acondicionamiento para el sensor de flujo.

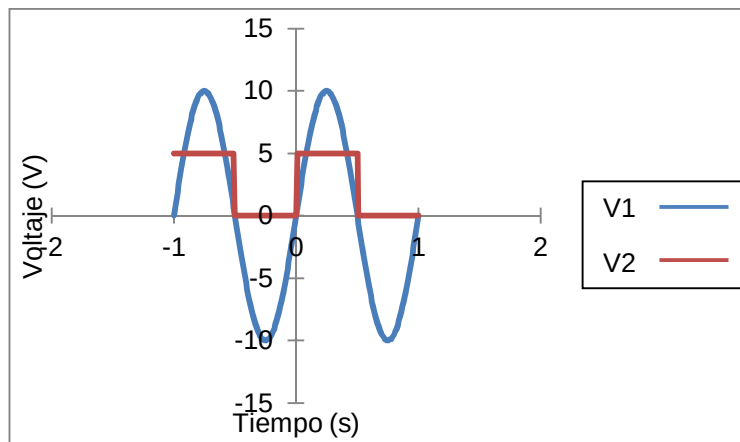


Figura 8. Función característica del comparador.

1.2.3 Etapa de potencia para la bomba hidráulica

Para el control de la bomba hidráulica se emplea un relevador que conmuta la energía eléctrica 127 (V_{AC}) mediante la señal de comando en RB0. Para esto, se emplea un optoacoplador, U8, con salida a transistor NPN, para aislar al relevador del microcontrolador y un relevador de tipo normalmente abierto, RE1. El relevador empleado es un G5LE-1A4 [Omron, sin fecha]. El circuito empleado se muestra en la figura 9.

Cuando V1 es un estado bajo (L) o de alta impedancia (Z), esto hace que el transistor de U8 y el transistor de potencia PNP Q1 se encuentren en la región de corte, por lo que no habrá corriente en la bobina del relevador y la bomba, BH, no recibirá energía de la línea 127(V_{AC}). Cuando V1 se encuentra en un estado alto (H), ambos transistores operan en la región de saturación, cerrando el relevador, y en consecuencia, activando la bomba, BH.

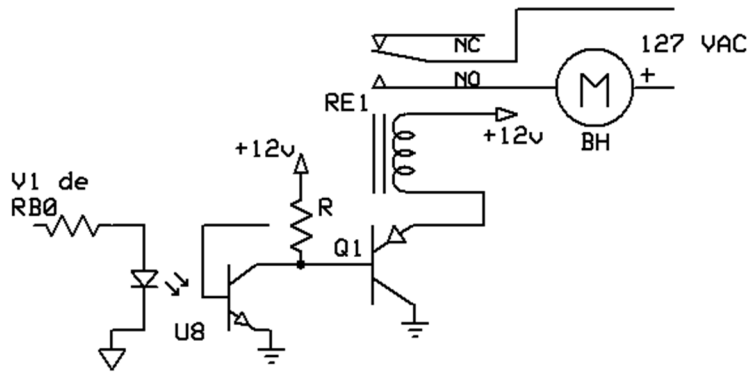


Figura 9. Etapa de potencia para controlar la bomba hidráulica.

1.2.4 Etapa de potencia para la electroválvula

La electroválvula utilizada es una PV34-B [Omega Engineering Inc., sin fecha-c]. La tarjeta original resultó defectuosa, pero se observó que el motor de la electroválvula es un motor a pasos unipolar 4H8618S0676D de Telco, cuyas especificaciones son:

- 1.8 (°/paso)
- 12 (V) de polarización
- 0.67 (A)

Por lo tanto, para mover el motor se emplea una etapa de potencia que consiste en optoacopladores y transistores de potencia NPN. El circuito empleado se muestra en la figura 10. La operación del circuito es similar a la descrita en la sección 1.2.3, solamente que ahora se tiene un transistor de potencia NPN. Para los cuatro embobinados del motor a pasos se emplean cuatro circuitos como el de la figura 10.

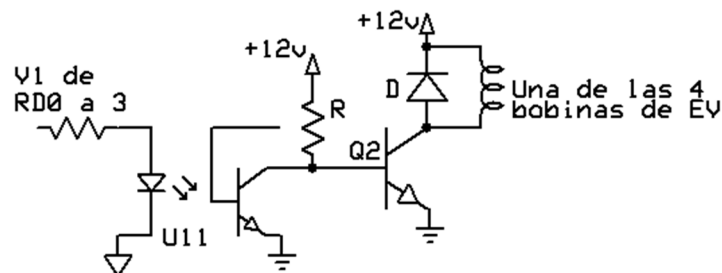


Figura 10. Etapa de potencia para electroválvula.

Durante la operación de la electroválvula, por cada paso, las bobinas se cargan magnéticamente. Al momento de hacer el cambio de paso, el inductor tratará de resistir la caída repentina de corriente (la caída de voltaje en la bobina es grande), usando la energía magnética que tenía almacenada. Esto hace que la polaridad de la bobina se invierta, sin embargo, el transistor podría no soportar este voltaje en reversa. Para contrarrestar esto, se coloca un diodo, D, en el colector del transistor de forma que el diodo esté polarizado de forma inversa durante la carga de la bobina. Cuando deje de circular corriente en el transistor, el diodo formará un lazo con el inductor de forma que éste se descargue sin dañar al transistor.

1.2.5 Acondicionamiento de la señal de posición de la electroválvula

Para obtener la posición de apertura de la electroválvula se empleó un potenciómetro fijado a la flecha del motor de ésta. Este potenciómetro se muestra en la figura 11. La polarización de 0 a 5 (V) permite que el voltaje V1 obtenido del cursor del potenciómetro esté en el rango del canal CAD del microcontrolador, como se muestra en la tabla 1.

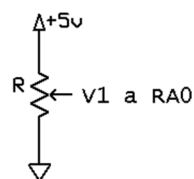


Figura 11. Circuito de acondicionamiento para la posición de la electroválvula.

Apertura de la electroválvula (%)	Resistencia (k Ω)	V1 (V)	Valor registrado por el canal CAD
0	15.015	3.7537	3075
100	1.3712	1.3428	1100

Tabla 1. Datos del transductor de posición de la electroválvula.

Los valores registrados por el canal CAD se utilizan en el firmware del microcontrolador y software para PC para establecer los valores máximo y mínimo de apertura de la electroválvula.

1.2.6 Etapa de control y comunicación

Para utilizar el microcontrolador PIC18F4553 [Microchip, 2007], es necesario colocar un número mínimo de componentes externos tal como se observa en la figura 12.

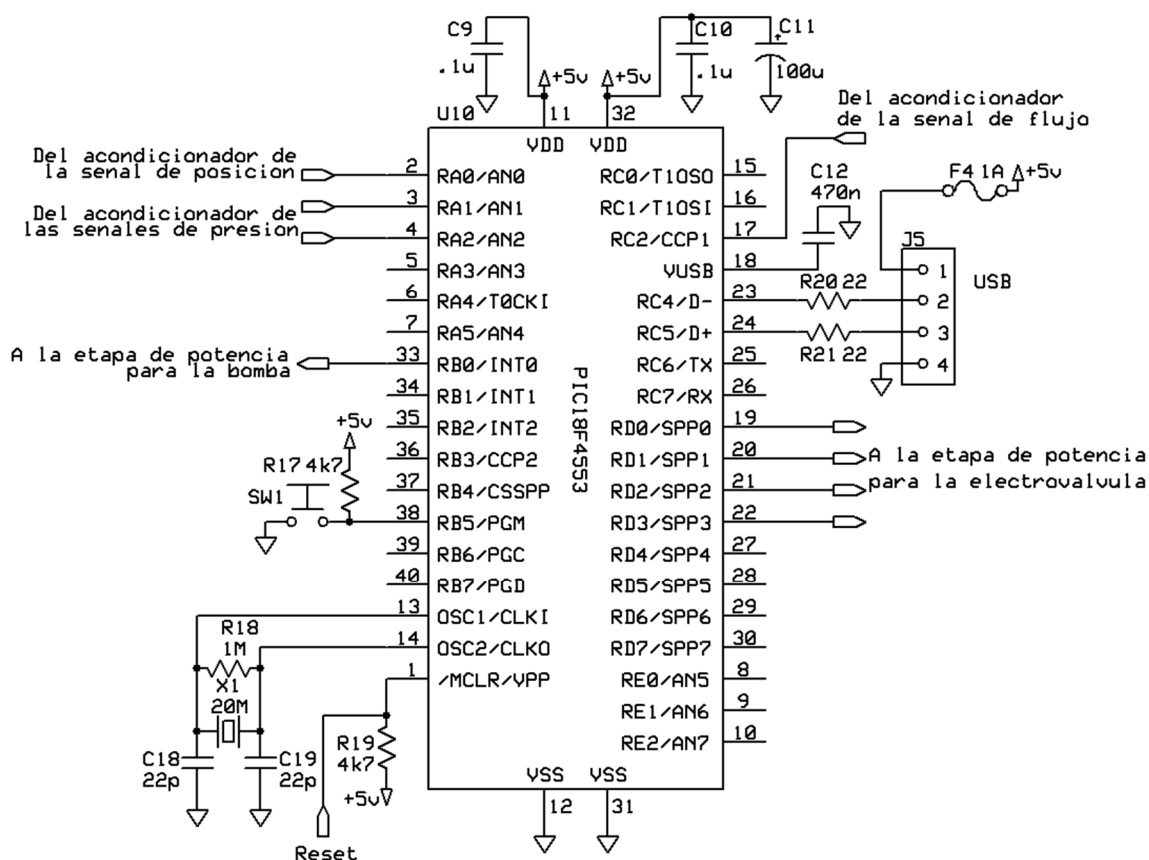


Figura 12. Componentes discretos básicos para el PIC18F4553.

En el microcontrolador se ejecuta el algoritmo de control para generar las señales que se aplican a las siguientes cargas:

- En RD0 a RD3 se generan los pulsos discretos para impulsar la etapa de potencia que alimenta el motor a pasos de la electroválvula.
- En RB0 se genera el pulso digital que impulsa la etapa de potencia que enciende o apaga la bomba hidráulica.

Las señales que ingresan al microcontrolador para ser procesadas por el algoritmo de medición son las siguientes.

- En RA0 se digitaliza el voltaje proveniente de la etapa de acondicionamiento de la señal de posición de la electroválvula. El resultado se almacena en la variable *ValorCAD0*.
- En RA1 y RA2 se digitalizan los voltajes provenientes de la etapa de acondicionamiento de las señales de presión. Los resultados se almacenan en las variables *ValorCAD1* y *ValorCAD2*.
- En RC2 ingresan los pulsos provenientes de la etapa de acondicionamiento de la señal de flujo para su conteo y almacenamiento en la variable *Periodo*.

Para habilitar la funcionalidad USB es necesario colocar un cristal de cuarzo con frecuencia de resonancia en paralelo de 20 (MHz). Un PPL interno (PLL5) se encarga de elevar esta frecuencia a 48 (MHz), que es la frecuencia a la cual se realizan transferencias por USB. Éste microcontrolador posee un regulador interno de 3.3 (V) para la comunicación USB, además de resistores de pull-up internos. Microchip recomienda un capacitor en el pin V_{USB} para hacer al regulador interno más estable.

Se ingresa la señal de *Reset* mediante un botón normalmente abierto. Este botón provoca que el microcontrolador se reinicie y debe ser accesible para el usuario final de tal manera que se coloca de forma externa al circuito impreso.

Se incluye otro botón directamente en el circuito impreso, que es útil si el microcontrolador tiene cargado un gestor de arranque (*bootloader*). El bootloader permite ejecutar el firmware actual o poder reprogramar el microcontrolador sin necesidad de removerlo del circuito con fines de depuración. El sistema electrónico final no tiene un bootloader.

Para energizar el microcontrolador se usa la propia entrada USB, la cual está compuesta por cuatro líneas: dos usadas para el intercambio de información, una de polarización 5 (V) y la tierra.

1.2.7 Firmware del microcontrolador

El firmware del microcontrolador contiene los algoritmos de control y medición que permiten controlar los actuadores y capturar las señales del banco hidráulico. Está compuesto por una rutina principal y tres rutinas de interrupción que serán explicadas a continuación. El código fuente está programado en lenguaje C para PIC [Custom Computer Services, 2007] utilizando el ambiente integrado de desarrollo de Microchip [Microchip, 2009]. El código fuente completo se encuentra en la carpeta *CodigoFuente/PIC* del CD anexo.

Rutina principal

La figura 13 muestra la rutina principal del programa. Una vez que se inician los periféricos, se ejecuta un ciclo indefinido en donde se encuesta el paquete de datos recibido vía USB. El paquete está compuesto por un segmento de *Comando* en donde se indica la acción a ejecutar y un segmento de *Dato* en donde se especifica el parámetro que se debe actualizar. Los posibles comandos son:

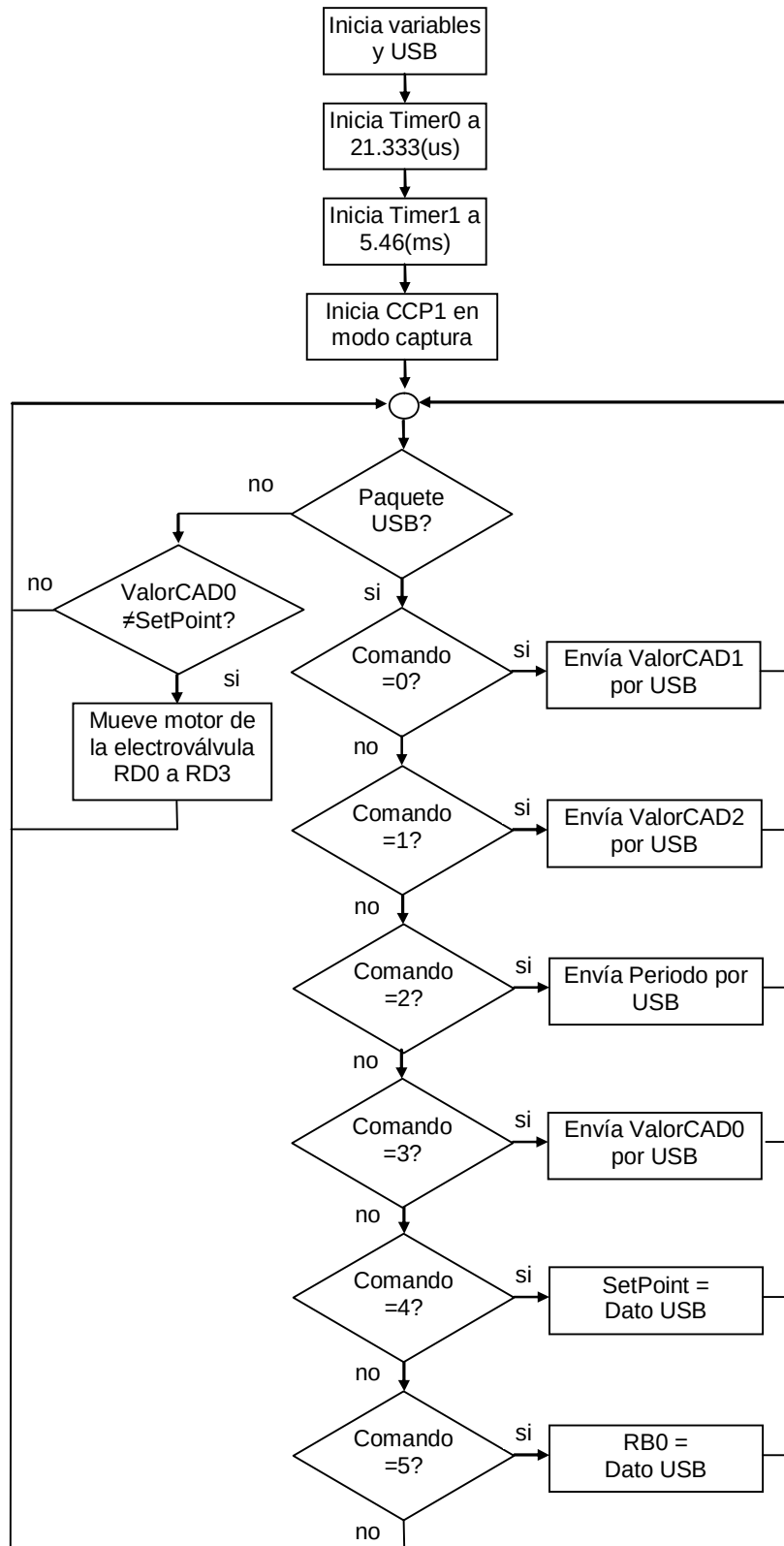


Figura 13. Rutina principal.

- Envía la medición de la presión P_1 almacenada en la variable *ValorCAD1*.
- Envía la medición de la presión P_2 almacenada en la variable *ValorCAD2*.
- Envía la posición de la electroválvula P_{EV} almacenada en la variable *ValorCAD0*.
- Envía la medición de flujo MF almacenada en la variable *Periodo*.

Los posibles datos a actualizar son:

- La posición deseada en la electroválvula almacenada en la variable *SetPoint*.
- El estado encendido/apagado de la bomba hidráulica en el puerto RB0.

En el estado ocioso del ciclo se ejecuta el algoritmo que controla la posición de la electroválvula al comparar la posición de la electroválvula en la variable *ValorCAD0* contra la posición de referencia en la variable *SetPoint*. El valor de referencia para la posición de la electroválvula es elegido por el usuario en el software de operación y enviado por USB. El movimiento del motor de la electroválvula se consigue al enviar la cadena de pulsos binarios en RD0 a RD3.

Interrupción por CCP1

En la interrupción por captura en el CCP1, mostrada en la figura 14, se almacena el valor de la cuenta realizada por el TIMER0 de los pulsos que ocurren en RC2. Estos pulsos son el resultado de adecuar la señal del sensor de flujo. El resultado de la cuenta se almacena en la variable *Periodo*. Una vez realizado esto, vuelve a iniciar la cuenta en cero. La variable *Periodo* contiene la información necesaria para que el programa en la computadora realice la conversión a una variable con unidades de gasto.

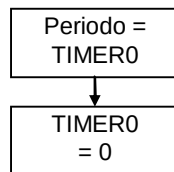


Figura 14. Interrupción por CCP1.

Interrupción por TIMER0

En la interrupción por el desbordamiento del TIMER0 de la figura 15, se cambia el estado del pin E0 (usada para depuración del programa) y hace que *Periodo* almacene un cero. Este cero será procesado en el software de operación para PC para indicar que no hay flujo. Esta interrupción ocurre cada $21.33(\mu s) \cdot 2^{16} = 1.3981$ (s) ya que el desborde ocurre cuando el registro TIMER0 de 16 bits llega a su cuenta máxima y éste es configurado para oscilar a 21.33 (μs).

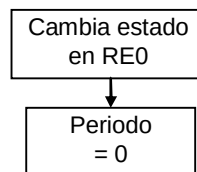


Figura 15. Interrupción por CCP1.

Interrupción por TIMER1

La rutina mostrada en la figura 16 inicia cuando el TIMER1 del PIC18F4553 se desborda al cabo de 5.46 (ms) desde que inicia el programa. Esto genera una interrupción e inicia una rutina en donde se realiza la

conversión analógico a digital en los canales RA0, RA1 y RA2, 45 veces, sumando estos datos en las variables *acumulador0*, *acumulador1* y *acumulador2*. Con estos datos se obtienen los valores promedio cada 0.25 (s) que se almacenan en las variables *ValorCAD0*, *ValorCAD1* y *ValorCAD2*. La variable *ValorCAD0* contiene la información necesaria para que el programa en la computadora realice la conversión a una variable con unidades de porcentaje de apertura en la electroválvula. Las variables *ValorCAD1* y *ValorCAD2* contienen la información necesaria para que el programa en la computadora realice la conversión a variables con unidades de presión. La variable *contador* mantiene el número de interrupciones a las cuales se ha ingresado para que, una vez alcanzadas las 45 repeticiones, se realicen los promedios.

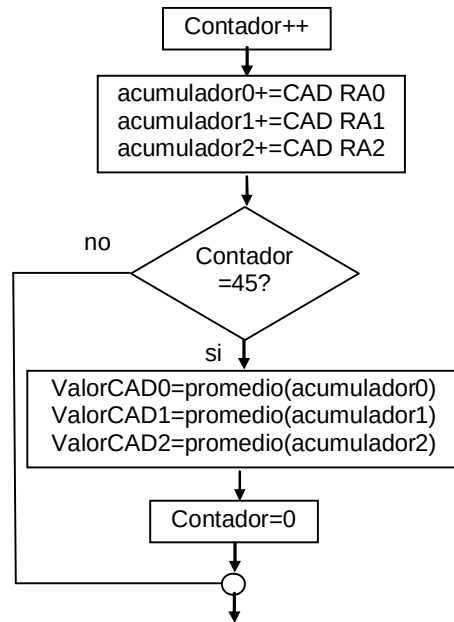


Figura 16. Interrupción por TIMER1.

1.2.8 Etapa de alimentación

El sistema electrónico utiliza 4 voltajes de operación:

- Polarización 5(V) 0.5(A) para la etapa de control. Se obtiene de la conexión USB con la computadora huésped.
- Polarización 12(VE) (3A) para las etapas de potencia del motor de la electroválvula y la bomba hidráulica. Se obtiene con una fuente regulada con impulsor de corriente, figura 17. La tierra de esta fuente está aislada del resto del circuito con el fin de evitar interferencias con las etapas de control y de acondicionamiento de señales.
- Polarización $\pm 12(V)$ (1A) para los circuitos de acondicionamiento de señales. Se obtiene de una fuente regulada doble que comparte su conexión a tierra con la polarización de 5 (V), figura 18.

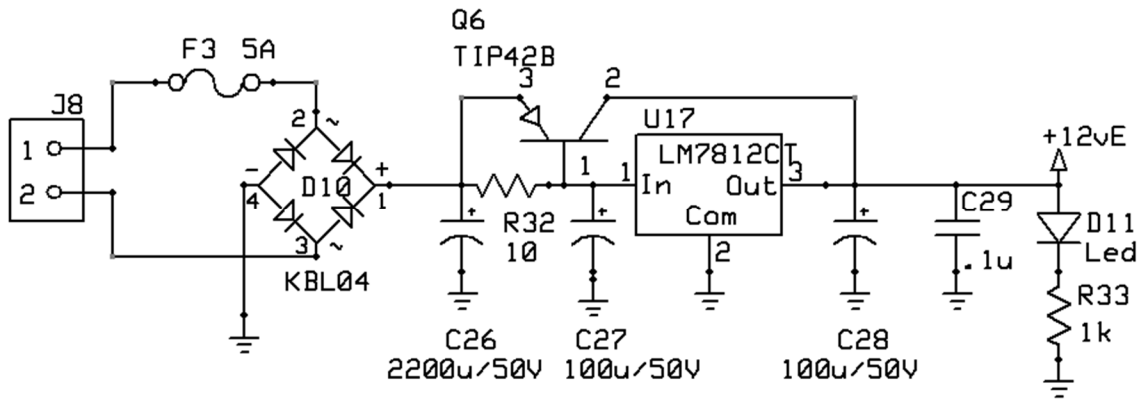


Figura 17. Polarización 12(V) (3A).

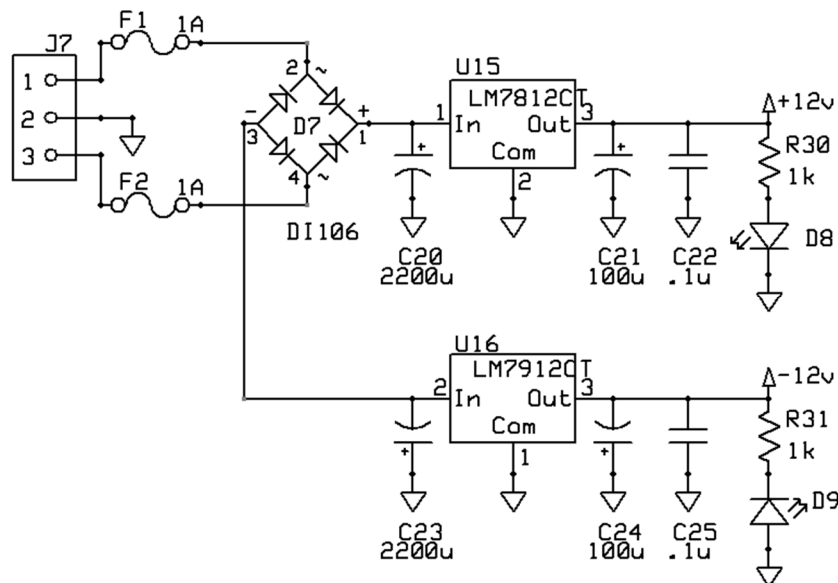


Figura 18. Polarización $\pm 12(V)$ (1A).

1.3 Tablero hidráulico y accesorios mecánicos

Se diseñaron y construyeron diversos elementos mecánicos que dan soporte al banco hidráulico, como se describe a continuación. Los detalles de la construcción de estos elementos se muestran en el anexo B y en los archivos de la carpeta CADTablero del CD anexo.

1.3.1 Tablero y estructuras de soporte

El tablero hidráulico construido se muestra en la figura 19.

El prototipo de la figura 19 consta de un tablero rectangular de material MDF $\frac{3}{4}$ ", formando una superficie de 1066mm x 2400mm x $\frac{3}{4}$ " que sirve de base al circuito hidráulico, dos tiras de 140mm x 1066 x $\frac{3}{4}$ " que van a lo largo de la base en la parte superior e inferior y dos tiras laterales de 1028mm x $\frac{3}{4}$ " formando los costados del tablero.

Este tablero tiene la función de albergar 5 líneas de tubería de PVC y CPVC con 45 sujetadores que se fijan al tablero por medio de 45 pijas de $\frac{3}{16}$ " a la base. Cada sujetador contiene un separador y

abrazadera de fijación. La función de los separadores es dar un alejamiento de la base del tablero, a la abrazadera que sostiene al tubo, y está fabricado en barra de PVC de 1" de diámetro x 1/8" de espesor y una perforación central de 3/16".

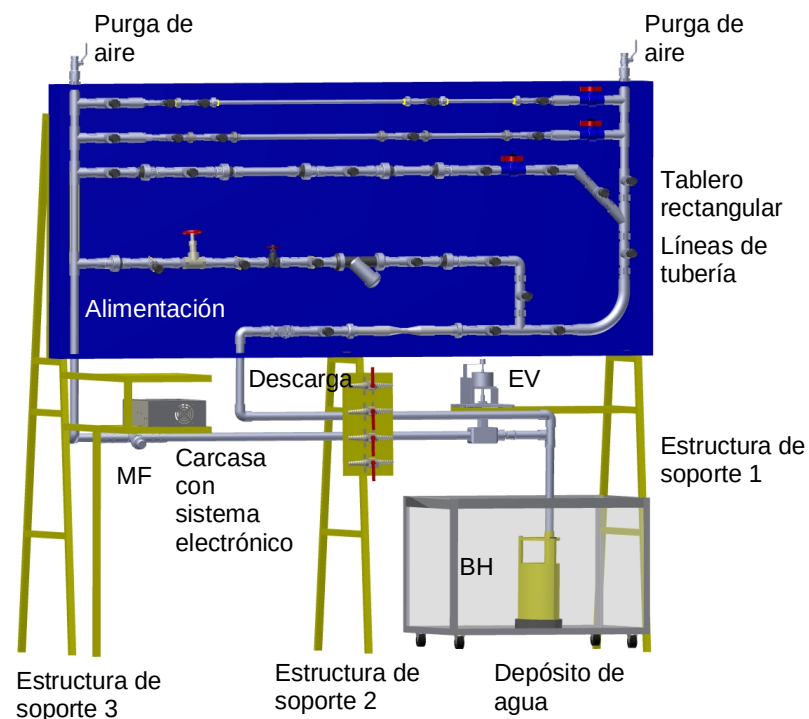


Figura 19. Tablero hidráulico.

Las cinco líneas de tubería contienen diversos conectores rápidos con el propósito de conectar las mangueras flexibles de los transductores de presión. Las líneas son las siguientes:

- Línea 1. Línea de experimentos. Es una línea de tubería de PVC de 1/2" con una sección transparente en donde se pueden realizar experimentos de visualización de fluidos. Cuenta con un marco de MDF para soporte y desplazamiento de WebCam. La sección transparente cuenta con un conector plástico para inyectar colorante al fluido.
- Línea 2. Línea de accesorios de 1/2". Es una línea en donde se pueden evaluar los siguientes accesorios: válvula de globo, válvula de compuerta, filtro, codo de 90° y T.
- Línea 3. Línea de tubería y accesorios de 1/2". Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de PVC con tres combinaciones de diferente longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: tuerca unión, válvula de esfera, codo 45°, Y griega y codo RL.
- Línea 4. Línea de tubería de 1/4" PVC. Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de PVC con tres combinaciones diferentes de longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: reductor, expansor y tuerca unión.
- Línea 5. Línea de tubería de 1/4" CPVC. Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de CPVC con tres combinaciones diferentes de longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: reductor, expansor y tuerca unión.

En la parte superior y a los extremos del tablero se encuentran orificios de 2" de diámetro que sirven para pasar tubería con llaves de paso con propósito de purga de aire. En la parte inferior se encuentran dos perforaciones con la finalidad de pasar el tubo de alimentación del flujo de agua y el tubo de descarga.

El tablero esta soportado por tres estructuras metálicas de tubular cuadrado de 1". Las tres estructuras parten de una forma triangular de 2100mm de altura y 652mm de base, pero cada una es diferente, como se describe a continuación:

- Estructura de soporte 1. Soporte de electro válvula. De la parte media de la estructura triangular, a 220mm por abajo del soporte superior, se encuentra un tubular de donde se sujeta un marco de 698mm x 186mm x 1". La parte superior de este marco sirve de apoyo y sujeción para la electroválvula.
- Estructura de soporte 2. Soporte de conexiones hidráulicas para los transductores de presión. En la parte media de la estructura triangular se encuentra el apoyo al tablero donde salen dos tubulares de 50mm en la parte superior del tubular inclinado de la estructura. Esto sirve para colocar un marco de tubular cuadrado de 1" con dimensiones de 400 mm x 200 mm, cubierto en la parte superior con lámina negra calibre 18 abarcando toda la superficie de 400 mm x 200 mm. El marco cubierto tiene 16 perforaciones de 3/16" para pijas que sujetan las abrazaderas para colocar 4 válvulas de globo donde se conectan las mangueras de los transductores de presión.
- Estructura de soporte 3. Soporte de control electrónico y base de laptop. Partiendo de la parte media de la estructura triangular, a 50 mm por debajo de la superficie de apoyo del tablero, salen dos tubulares de 1" con dimensiones de 805 mm, con otro tubular igual de 227 mm formando un marco. En la parte media del tubular inferior sale un tubular de 875mm que sirve de apoyo al marco quedando un marco de 805mm x 227mm. En los extremos de los tubulares se colocan otros tres formando dos marcos: uno superior y otro en la parte inferior. En estos marcos, en sus respectivas partes superiores, se colocan dos láminas calibre 18 de 355mm x 400mm. La función de cada marco es de contención: en la parte inferior se contiene la carcasa de control electrónico y en la parte superior se contiene a la computadora que controla y monitorea el banco hidráulico.

1.3.2 Carcasa

Para la fabricación de la carcasa del sistema electrónico que se muestra en la figura 20, se utilizaron dos láminas calibre 18 para maquinar las carcasas superior e inferior. Como proceso de corte de lámina se utilizó corte por chorro de agua (Hidro jet). Este proceso fue empleado por las series de perforaciones que lleva la lámina para la colocación de dispositivos electrónicos y también ranuras ventilación.

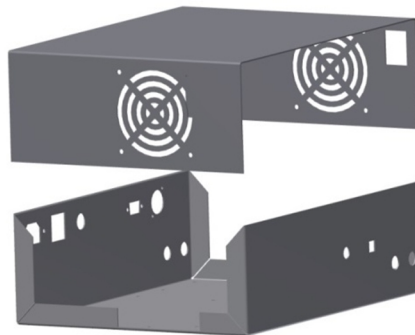


Figura 20. Carcasa del sistema electrónico.

La carcasa está compuesta por las dos secciones que se describen a continuación:

- Carcasa inferior o base. Para la elaboración de la carcasa se trabajó una lámina negra calibre 18 de 434mm x 326mm con 16 perforaciones de 1/8". En la parte central con extremo derecho de la

lámina se encuentran dos barrenos de 13mm de diámetro. En una línea superior de la carcasa se encuentran un barreno de 22mm con dos barrenos a los lados de 1/8", además otro barreno de 15 mm y tres perforaciones con distinta geometría cada una. En la parte izquierda se encuentran dos barrenos de 13mm, otro de 11mm y una perforación de geometría cuadrada de 10mm por lado y dos barrenos de 1/8" que se encuentran a su lado. En el desarrollo de lámina a lo largo y en los extremos se encuentran dos cejas de 10mm con fines de sujeción.

- Carcasa superior. Para su elaboración se utiliza una lámina calibre 18 de 543mm x 340mm con ranuras de ventilación semicirculares en los extremos de la lámina desarrollada con barrenos de 3/16" para la fijación de ventiladores y una perforación rectangular de 31mm x 22mm para el interruptor general.

1.3.3 Depósito de agua

Con acrílico de 1/2" se fabrica una caja sin tapa de 820mm x 600mm y una altura de 531mm con una perforación en el extremo de 1" para colocación de una brida con el fin de poder drenar el depósito cuando no tiene uso. Como refuerzo se coloca una estructura formada por de ángulo de aluminio de 1" conteniendo la caja. En la parte inferior de la estructura de aluminio se colocan, en cada extremo del cuadrado, cuatro ruedas locas para posibilitar el traslado del depósito. La figura 21 muestra el depósito de agua construido.

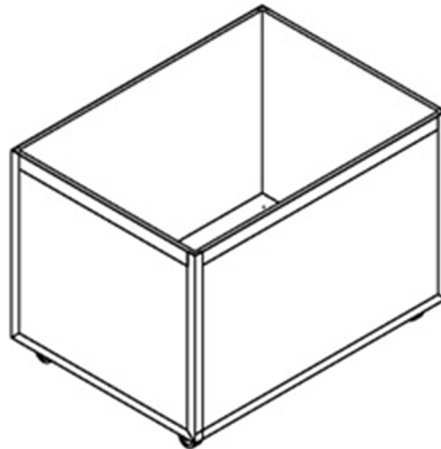


Figura 21. Depósito de agua.

2. Descripción del software de operación

El software desarrollado para este proyecto consiste de una interfaz de operación entre la computadora y el sistema electrónico. El software contempla la visualización de los datos adquiridos del sistema electrónico en la pantalla, el control del flujo en el circuito hidráulico, la posibilidad de realizar una gráfica de presión contra velocidad de flujo y la capacidad de guardar los datos en un archivo de texto.

La información adquirida por el sistema electrónico y los comandos de control son transmitidos a través de una comunicación USB con una computadora. Se desarrolló un programa en Visual C++ utilizando las librerías MFC y la librería de enlace dinámico (DLL) mpusbapi.dll de Microchip para establecer la comunicación USB; interpretar los datos obtenidos de los sensores y enviar los comandos de control a la bomba y la electroválvula.

2.1 Procedimiento de instalación

En este apartado, se explicará la forma de instalar el programa en una computadora con Microsoft Windows.

2.1.1 Requisitos mínimos

- Sistema operativo compatible
 - o Windows 7 SP1 (x86 y x64).
 - o Windows 8 (x86 y x64).
 - o Windows Server 2008 R2 SP1 (x64).
 - o Windows Server 2008 SP2 (x64).
 - o Windows Vista SP2 (x86 y x64).
 - o Windows Server 2012 (x64).
 - o Windows XP.
 - o Windows 2003.
- Requisitos de hardware:
 - o Procesador a 1,6 GHz o superior.
 - o 1 GB de RAM (1,5 GB si se ejecuta en una máquina virtual).
 - o 10 GB de espacio disponible en el disco duro.
 - o Unidad de disco duro de 5400 rpm.
 - o Tarjeta de vídeo compatible con DirectX 9 con una resolución de pantalla de 1024 x 768 o superior.
 - o 2 puertos USB

2.1.2 Instalación del software

1. Copiar el contenido del directorio Programa/Instalacion del CD anexo a un directorio en el disco duro de la computadora anfitriona, por ejemplo, C:\Banco.
2. Conectar el cable USB entre la computadora y el sistema electrónico. Energizar el sistema electrónico.
3. En este momento Windows indicará la presencia de nuevo hardware encontrado. Indicar que el software controlador se instalará desde el directorio Programa/Manejadores en la unidad de disco.
4. Verificar que el controlador ha sido correctamente instalado desde el Panel de control de Windows. El controlador se deberá desplegar como "USB Custom Devices/Microchip Custom USB Device" en el administrador de dispositivos.

5. Con el “Control de Cuentas de Usuario de Windows” deshabilitado y con privilegios de administrador, desde el directorio C:\Banco ejecute en la línea de comandos el siguiente comando:

regsvr32 ntgraph.ocx

6. Recibirá la notificación que el archivo ocx, o control ActiveX ha sido correctamente instalado. De otra manera regrese al paso número 5 y verifique el estado del control de cuentas de usuario y los privilegios de la cuenta.
7. Para verificar la correcta operación del software y del sistema electrónico, desde el explorador de archivos de Windows ejecute el archivo C:\Banco\ControlBanco.exe. Observe el despliegue y verifique que la apertura actual de la electroválvula se aproxime al valor en el centro del indicador de perilla, como se describe a continuación.

2.2 Descripción del software en el ámbito del operador

La figura 22 muestra la pantalla que se despliega al ejecutar el archivo ControlBanco.exe.

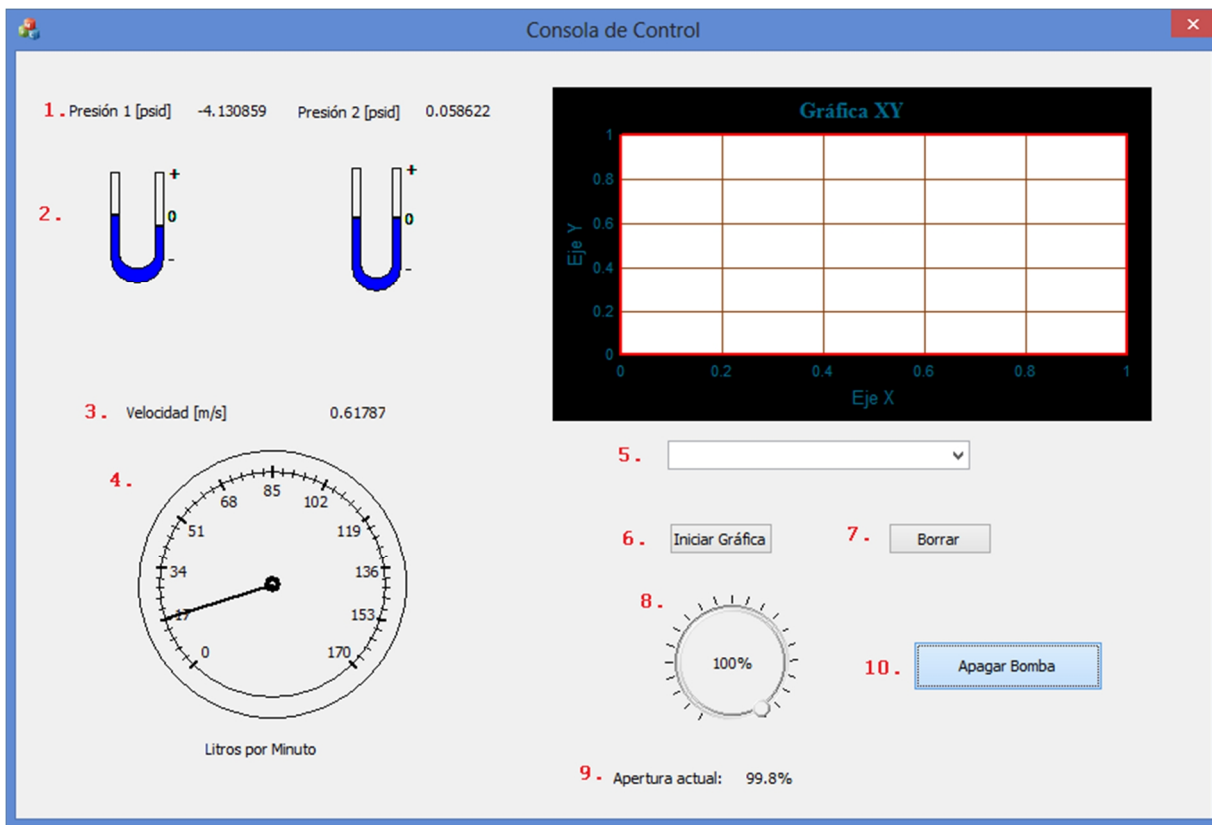


Figura 22. Ventana principal del programa en Funcionamiento.

Sobre la figura 22 se indican en texto rojo los siguientes elementos:

1. Son los indicadores en texto para los sensores de presión. Presión 1 es para el sensor de ± 15 (psid) y Presión 2 para el sensor de ± 30 (psid).

2. Son los indicadores visuales para los sensores de presión. El dibujo cambia en función de la presión medida por los sensores.
3. Es el indicador textual para la velocidad del flujo o gasto volumétrico medido en (m/s).
4. Es el indicador visual para el flujo en (lt/min). Éste valor es obtenido a partir de la velocidad del fluido, su densidad y el diámetro de la tubería por donde pasa. En este caso, se toma el diámetro del aditamento con el cual se conecta al circuito (1").
5. Es el selector de datos a graficar. Las opciones disponibles son Presión ± 15 (psid) contra Velocidad de flujo (m/s) y Presión ± 30 (psid) contra Velocidad de flujo (m/s).
6. Inicia la rutina para adquirir datos y posteriormente graficarlos. Una vez adquiridos, el programa solicita un lugar para guardar la información en un archivo con extensión txt.
7. Borra lo dibujado en la gráfica, como las variables donde se almacenaron los datos.
8. Es la perilla giratoria para ingresar la posición de referencia o SetPoint para la electroválvula. Al manipularse envía el porcentaje de apertura al sistema electrónico para fijar la posición. Al inicio del programa el porcentaje de apertura se establece por omisión al 100% (completamente abierta).
9. Es el indicador textual del porcentaje de apertura de la electroválvula registrado en el sistema electrónico. Este valor se debe aproximar en todo momento al valor de referencia ingresado en el punto 8. Ya que al inicio del programa se establece el 100% de apertura de la electroválvula, es conveniente que al iniciar el programa se espere a que el indicador textual alcance el valor establecido por la perilla giratoria.
10. Es el botón de Encendido/Apagado de la bomba hidráulica. El texto cambia en función de qué estado se encuentre la bomba. Como se puede ver en la figura 22, la bomba está funcionando. Se recomienda no encender la bomba si la perilla giratoria se ha establecido en 0% (completamente cerrada) ya que esto podría ocasionar un sobrecalentamiento en la bomba hidráulica.

2.3 Descripción del software en el ámbito del programador

El software fue desarrollado utilizando la MFC de Visual C++ [Kruglinski, 1988] dentro del ambiente de programación Visual Studio 2012. El proyecto, construido sobre la base de una caja de diálogo, fue nombrado inicialmente "Visual" y en la carpeta de éste se encuentran los archivos de código fuente y ejecutables. En la carpeta raíz del proyecto, existe una carpeta llamada "Release", donde se colocaron los archivos necesarios para poder instalar el programa en otros equipos. Estos archivos se encuentran en el directorio CódigoFuente/VisualC del CD anexo.

La figura 23 muestra el dialogo de control durante la etapa de desarrollo. En esta figura se aprecian los indicadores tipo barra de progreso (usados para la medición de presión y flujo), el control ActiveX para la graficación de datos, el menú usado para seleccionar los datos a graficar, una barra deslizable para el control de la electroválvula y diversos botones.

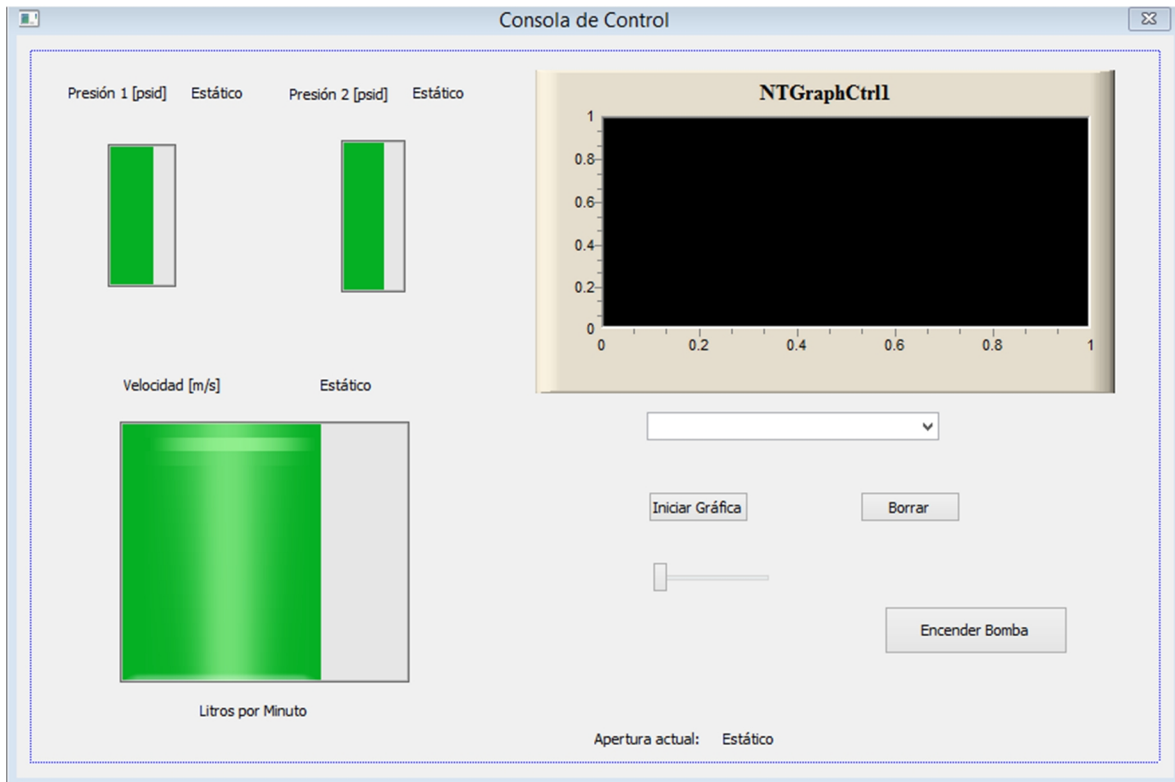


Figura 23. Consola de control durante el desarrollo.

Las clases usadas en el proyecto de programación son las mostradas en la figura 24.

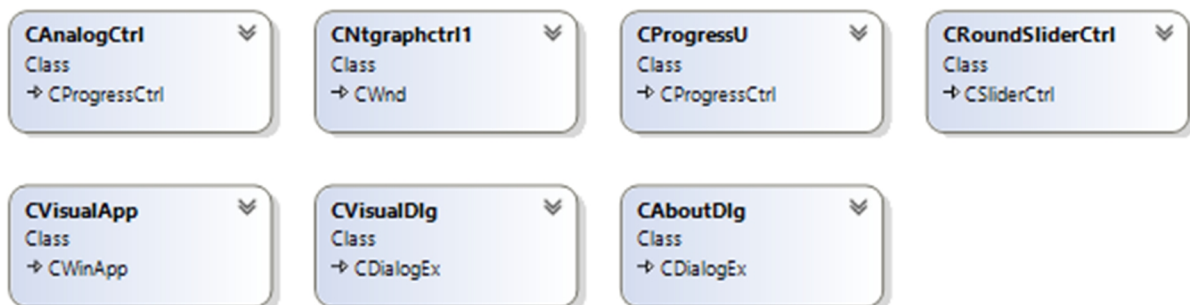


Figura 24. Clases usadas en el programa.

A continuación una descripción de las clases de la figura 24 incluyendo sus métodos respectivos.

2.3.1 Clase CAnalogCtrl

Clase con base en CProgressCtrl de la MFC. Modifica el dibujo original de un control “barra de progreso” para que se vea como un indicador analógico. Se utiliza para desplegar gráficamente el caudal del flujo MF en un indicador analógico de aguja. La clase CAnalogCtrl hereda la funcionalidad de su clase base. Los métodos que conforman a CAnalogCtrl son mostrados en la figura 25.

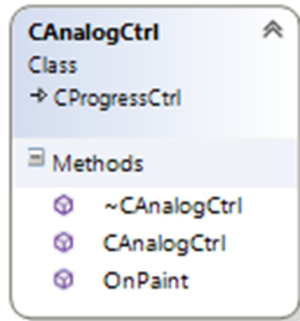


Figura 25. Métodos de la Clase CAnalogCtrl.

Los métodos de esta clase son los siguientes.

~CAnalogCtrl: Método Vacío.

CAnalogCtrl: Método Vacío.

OnPaint: Responde a cada WM_PAINT que el sistema envíe. Este método se encarga de dibujar el medidor analógico y establecer la posición del indicador en función del flujo registrado por el sistema electrónico.

2.3.2 Clase CNTgraphctrl1

Contiene los métodos necesarios para controlar la gráfica XY de la consola de control. Los métodos fueron generados al importar el control ActiveX NTGraphControl [Teofilov, 2003] y pueden ser consultados en la referencia proporcionada.

2.3.3 CProgressU

Clase con base en CProgressCtrl de la MFC. Modifica el dibujo original de un control “barra de progreso” para que se vea como un indicador del tipo manómetro en U. Se utiliza para desplegar gráficamente las presiones diferenciales P_1 y P_2 . La clase CProgressU hereda la funcionalidad de su clase base. Los métodos que conforman a CProgressU son mostrados en la figura 26.

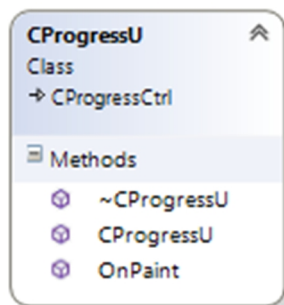


Figura 26. Métodos de la Clase CProgressU.

Los métodos de esta clase son los siguientes.

~CProgressU: Método vacío

CProgressU: Método vacío

OnPaint: Responde a cada WM_PAINT que el sistema envíe. Este método se encarga de dibujar a un barómetro en lugar de la barra de progreso normal. A su vez, modifica el nivel actual del manómetro de acuerdo a los valores leídos del sistema electrónico.

2.3.4 CRoundSliderCtrl

Clase con base en CSliderCtrl de la MFC. Modifica el dibujo original de un control deslizable para que se vea como una perilla analógica del tipo potenciómetro. Se utiliza para ingresar el porcentaje de apertura en la electroválvula. La clase CRoundSliderCtrl hereda la funcionalidad de su clase base. Los métodos que conforman a CRoundSliderCtrl son mostrados en la figura 27.

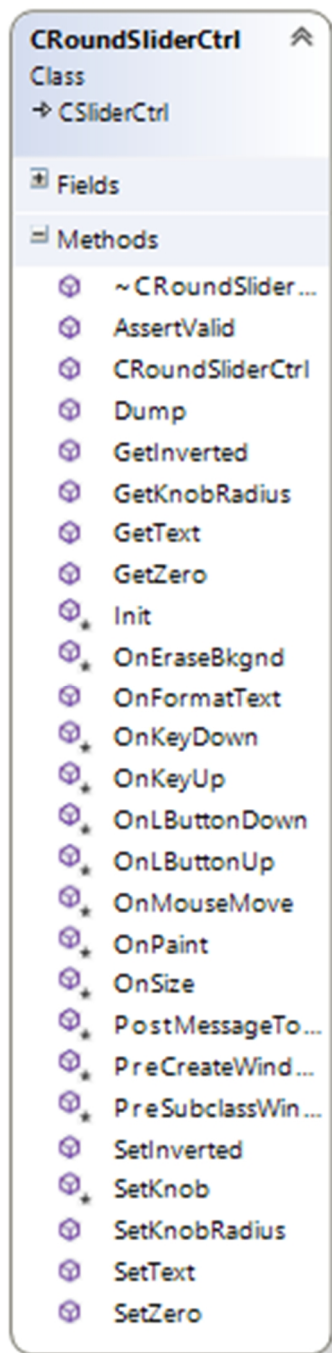


Figura 27. Métodos de la Clase CRoundSliderCtrl.

Los métodos de esta clase son los siguientes.

~CRoundSliderCtrl: Método vacío.

AssertValid: Verifica que este objeto sea válido. Por validez, se refiere a que revisa si el objeto tiene punteros hacia otros objetos y en caso de que así sea, que estos punteros no sean nulos.

CRoundSliderCtrl: Contiene información para la inicialización del control.

Dump: Permite extraer los datos de este objeto para ayudar con la depuración.

GetInverted: Regresa el estado actual de inversión del control.

GetKnobRadius: Obtiene el radio actual de la perilla.

GetText: Obtiene la cadena almacenada en el control. Esta cadena es un porcentaje.

GetZero: Obtiene el valor asignado a “cero”.

Init: Hace al control cuadrado, obtiene sus estadísticas importantes (centro y radio), y asigna la región activa del control a sólo la sección circular del control de deslizamiento.

OnEraseBkgnd: Regresa un valor distinto a cero si se ha borrado el fondo del control, cero si falla. Es llamado cuando el fondo necesita ser borrado (como cuando cambia de tamaño o se actualiza).

OnFormatText: Agrega la cadena base definida en CRoundSliderCtrl y el valor actual del control.

OnKeyDown: Define el movimiento del control en función de las teclas presionadas. Estas son lecha izquierda, flecha derecha, flecha arriba, flecha abajo, retroceder página y avanzar página.

OnKeyUp: Tiene rutinas para cuando ciertas teclas dejen de ser presionadas. En este caso no se realiza ninguna acción.

OnLButtonDown: Registra cuando se presiona el botón izquierdo del mouse. En esta rutina se permite al usuario arrastrar el control cuando mueva el mouse (esto es detectado por otro método), redibujándolo en el proceso.

OnLButtonUp: Registra cuando se levanta el botón izquierdo del mouse. En esta rutina se desactiva el arrastre de la perilla.

OnMouseMove: Detecta si el modo de arrastre está activado, en caso de que así sea, mueve la posición del control.

OnPaint: Responde a cada WM_PAINT que el sistema envíe. Este método se encarga de dibujar el control tipo perilla en función del tamaño del control insertado así como la posición actual.

OnSize: Ejecuta el método Init cuando se cambia el tamaño de la ventana.

PostMessageToParent: Envía un mensaje a la ventana principal. Este mensaje puede ser el movimiento del control y la posición de éste.

PreCreateWindow: Es un método que se ejecuta antes de la creación de la ventana que contiene al control, define aspectos como el rango y tamaño de línea de éste.

PreSubclassWindow: Este método es ejecutado para permitir la creación de subclases antes de que esta ventana se vuelva una subclase. Ejecuta la misma rutina que PreCreateWindow.

SetInverted: Permite al usuario invertir el control o no.

SetKnob: Realiza los cálculos necesarios para la posición actual de la perilla.

SetKnobRadius: Permite modificar el radio de la perilla.

SetText: Permite modificar la cadena de texto en el control de la perilla.

SetZero: Permite modificar el “cero” del control.

2.3.5 CVisualApp

Esta clase, con base en CWinApp de la MFC, es la que encapsula la inicialización, ejecución y terminación de un programa para el sistema operativo Windows. Este objeto se construye antes de que se creen las ventanas. Los métodos que conforman a CVisualApp son mostrados en la figura 28.

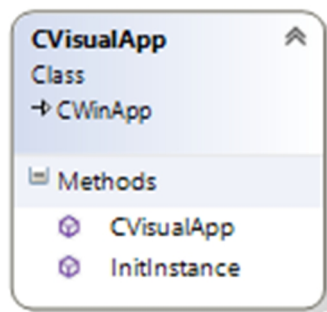


Figura 28. Métodos de la Clase CVisualApp.

Los métodos de esta clase son los siguientes.

CVisualApp: Es el constructor del objeto CWinApp, además de que guarda el nombre de la aplicación.

InitInstance: Contiene las rutinas de inicialización del diálogo principal. Permite la ejecución de varias instancias del programa al mismo tiempo.

2.3.6 CVisualDlg

Clase con base en CDialogEx de la MFC. Es la clase encargada de las acciones del diálogo “Consola de control”. En esta se realizan los procesos de conversión, envío y recepción de los datos utilizados por el sistema electrónico. Los métodos de la clase CVisualDlg son los mostrados en la figura 29.

Los métodos que conforman a CVisualDlg son los siguientes

CVisualDlg: Es el constructor de la clase. Además, inicializa variables miembro que serán usadas a lo largo de esta clase en particular.

DoDataExchange: Este método es usado para validar e intercambiar la información obtenida en un diálogo.

OnBomba: Verifica el estado actual del botón “Encendido/Apagado” en el diálogo. Cambia la cadena de texto del botón y envía los datos necesarios al sistema electrónico por USB para encender o apagar la bomba.

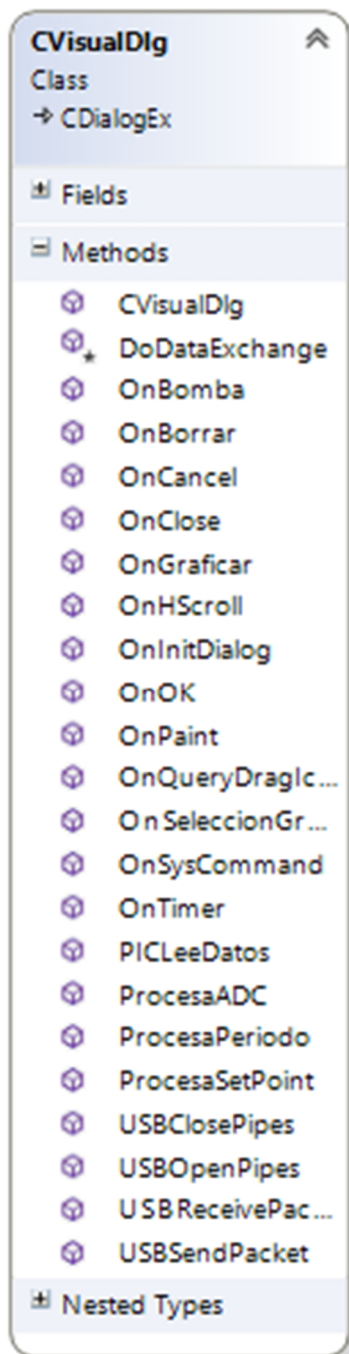


Figura 29. Métodos de la Clase CVisualDlg.

OnCancel: Esta función está diseñada para que no haga nada. El comportamiento original es cerrar la ventana sin guardar datos al momento de presionar un botón de cancelación o presionando la tecla “Esc”.

OnClose: Es ejecutada cuando se cierra el programa. Apaga la bomba hidráulica automáticamente.

OnGraficar: Es ejecutado cuando el usuario activa el botón de “Graficar”. Desactiva éste botón y el de “Borrar”, detecta el tipo de gráfica realizar y modifica los parámetros visualizados en el control ActiveX de

la gráfica. Reserva espacio de memoria para cien muestras de los sensores de presión, flujo y velocidad de fluido. Activa la rutina para guardar los datos en el método OnTimer.

OnHScroll: Es activado cuando se mueve el control deslizable. Transforma el valor porcentual de apertura en un número manejable para el sistema electrónico. Se crea un arreglo para almacenar esta información y se envía por USB al sistema electrónico para que actualice la posición de referencia o SetPoint en la electroválvula.

OnInitDialog: Agrega el elemento “Acerca de...” al menú de sistema. Establece el ícono para el cuadro de diálogo. Realiza la inicialización del control de apertura de la electroválvula, el indicador de flujo, un temporizador a 0.25 (s), y los parámetros iniciales para el control ActiveX de la gráfica. Enlaza la DLL de USB de Microchip [JVR, 2013] con el programa y hace que la electroválvula se abra completamente.

OnOk: Tiene la misma función que OnCancel. La diferencia es que esta función es activada al presionar la tecla “Enter”.

OnPaint: Por defecto, dibuja el ícono de “Minimizar”, si éste es incluido.

OnQueryDragIcon: Obtiene el cursor que se muestra mientras se arrastra la pantalla minimizada.

OnSeleccionGrafica: Obtiene el tipo de gráfica a realizar cuando se manipula el control tipo lista.

OnSysCommand: Despliega el diálogo “Acerca de...” cuando se selecciona del menú de sistema. Se puede acceder a éste si se presiona el botón derecho del mouse en el título de la ventana.

OnTimer: Cada 0.25 (s) solicita los datos de presión, periodo y posición al sistema electrónico por USB. Llama a los métodos que procesan los datos obtenidos en valores leíbles por el usuario y modifica los indicadores de texto para que muestren la información procesada. Si se ha activado el botón “Graficar”, almacena los datos que recibe en las localidades de memoria creadas al momento de pulsar ese botón. A su vez, grafica el conjunto de datos fijados por el menú de selección de gráfica. Una vez terminado el proceso, se guardan los datos obtenidos en un archivo de texto. En esta sección del programa se realizan las conversiones de información transmitida por el sistema electrónico a variables con unidades de medida. Los métodos empleados para la conversión son ProcesaADC, ProcesaPeriodo y ProcesaSetpoint.

PICLeeDatos: Este método recibe el puntero donde se almacenará el dato solicitado así como el identificador para el sistema electrónico y prepara el espacio de memoria para recibir la información solicitada. Envía el identificador por USB y a continuación recibe la respuesta del sistema electrónico.

ProcesaADC: Este método recibe la información de los transductores de presión y la procesa para que refleje el valor leído. Modifica la posición de los indicadores visuales de presión. Las ecuaciones (5) y (6) se emplean para la conversión de los datos en hexadecimal a valores de presión.

$$\text{Presion1} = (\text{ValorCAD1} - 2047) \times \frac{15}{2048} \quad (5)$$

$$\text{Presion2} = (\text{ValorCAD2} - 2047) \times \frac{30}{2048} \quad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) resultan de la conversión del valor hexadecimal del CAD en el sistema electrónico de 12 bits o 4096 niveles de cuantización a un valor de presión, como se muestra en la figura 30.

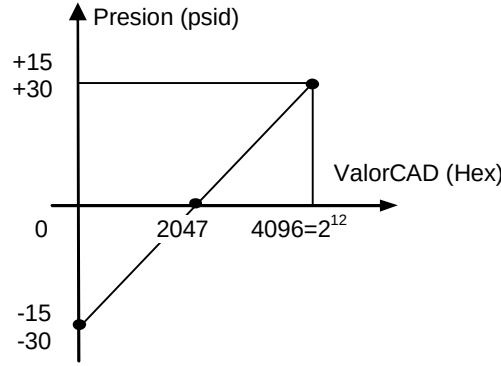


Figura 30. Conversión de hexadecimal a presión en (psid).

Donde *ValorCAD1* y *ValorCAD2* son las variables que contienen los datos registrados de los sensores PX26-015DV y PX26-030DV, respectivamente.

ProcesaPeriodo: Se procesa la variable *Periodo* del sistema electrónico para obtener la frecuencia de la señal de medición de flujo MF_{frec} mediante la ecuación (7).

$$MF_{frec} = \frac{1}{\frac{21.33(\mu s)}{Periodo}} = \frac{46875}{Periodo} (Hz) \quad (7)$$

Ya que *Periodo* representa el número de pulsos que ocurrieron en el TIMER0 que oscila a $1/21.33(\mu s)$. A partir de MF_{frec} y el dato proporcionado por el fabricante para la frecuencia de salida del sensor, 6 (Hz/fps), se obtiene la velocidad lineal del fluido, *Velocidad*, mediante la ecuación (8).

$$Velocidad = \frac{MF_{frec} (Hz)}{6 \left(\frac{Hz}{fps} \right)} = \frac{MF_{frec} (Hz)}{6 \left(\frac{1}{s} \right)} = \frac{MF_{frec} \left(\frac{1}{s} \right)}{19.685 \left(\frac{1}{m} \right)} = \frac{MF_{frec} \left(\frac{m}{s} \right)}{19.685 \left(\frac{m}{s} \right)} \quad (8)$$

Velocidad en (m/s) se despliega en la consola de control. Para convertir esta información a gasto volumétrico Q en (m^3/s), se emplea la ecuación (9) para el gasto por unidad de área, A , teniendo en cuenta que el diámetro del sensor de flujo es $1(\text{")}$ = 0.0254(m).

$$\begin{aligned} Q \left(\frac{m^3}{s} \right) &= Velocidad \left(\frac{m}{s} \right) \times A(m) = Velocidad \left(\frac{m}{s} \right) \frac{\pi D^2}{4} \\ &= Velocidad \left(\frac{m}{s} \right) \frac{\pi (0.0254m)^2}{4} = Velocidad \times 0.005067 \left(\frac{m^3}{s} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Finalmente, el gasto Q en (lit/min) que se despliega en la consola de control, se calcula con la ecuación (10)

$$Q \left(\frac{lt}{min} \right) = Q \frac{1}{1000} \frac{m^3}{60s} = \frac{Q}{60000} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (10)$$

Debido a que 1 (m³) son 1000 (litros) y 60(s) es 1(min).

ProcesaSetPoint: Procesa el valor adquirido del CAD al cual está conectado el sensor de posición de la electroválvula para que sea un valor porcentual. La ecuación empleada se obtiene al ajustar los datos de la tabla 1 a una recta, como se muestra en la figura 31.

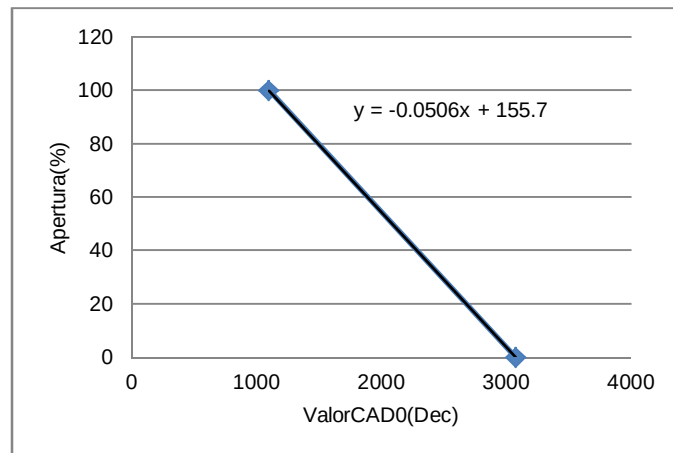


Figura 31. Relación entre la apertura de la electroválvula y valor del sensor de posición.

La ecuación (11) resulta de la figura 31 y se utiliza para desplegar el valor recibido del sistema electrónico en la consola de control.

$$\text{Apertura (\%)} = -0.0506\text{ValorCAD0} + 155.7 \quad (11)$$

USBClosePipes: Cierra la conexión de entrada y de salida hacia el sistema electrónico.

USBOpenPipes: Establece al dispositivo con el que existirá la comunicación USB, además de indicar a que Endpoint se enviará la información. Define a los canales de entrada y salida.

USBReceivePacket: Recibe el paquete de datos enviados del sistema electrónico. Se incluye el tamaño de arreglo esperado, la ubicación del arreglo donde se guardará la información y el tiempo de espera máximo para realizar la transferencia.

USBSendPacket: Envía un paquete de datos hacia el sistema electrónico. Tiene una estructura muy similar a USBReceivePacket.

2.3.7 CAboutDlg

Esta clase con base en CDialogEx de la MFC se encarga de desplegar la ventana “Acerca de...”, cuando se solicita. No tiene impacto en la funcionalidad del programa. Los métodos que conforman a CAboutDlg son mostrados en la figura 32.

Los métodos de esta clase son los siguientes.

CAboutDlg: Es el constructor de la clase.

DoDataExchange: Este método es usado para validar e intercambiar la información obtenida en un diálogo.

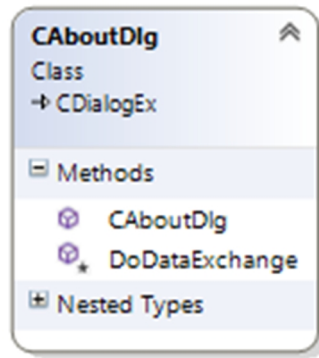


Figura 32. Métodos de la Clase CAboutDlg.

2.4 Procedimiento típico para operar el sistema

En la siguiente descripción se considera que se ha realizado el procedimiento de instalación inicial descrito en el anexo D.

1. Sin energizar los dispositivos, realizar las conexiones eléctricas que se indican en la figura 33 en donde EV= Electroválvula, MF=Medidor de flujo, BH=Bomba hidráulica.

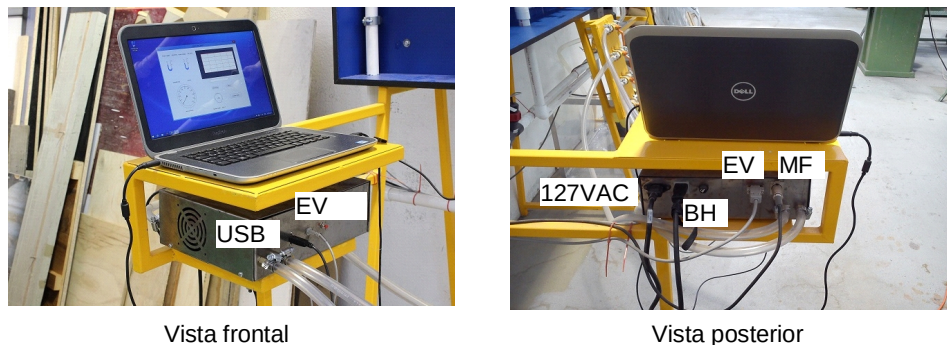


Figura 33. Conexiones del sistema electrónico.

2. Asegurarse que la computadora se encuentra conectada al sistema electrónico mediante el cable USB.
3. Encender la computadora.
4. Encender el sistema electrónico habilitando el interruptor localizado en la parte derecha del sistema electrónico.
5. Iniciar el programa ControlBanco.exe.
6. En la consola de control se actualizan automáticamente los valores de presión, velocidad de flujo y apertura actual de la electroválvula.
7. Los controles disponibles para el usuario son el botón para encender bomba/apagar bomba, la perilla giratoria para modificar la apertura actual de la electroválvula, el botón para iniciar la gráfica, el botón para borrar la gráfica y el control para seleccionar el tipo de gráfica. Operar los controles de acuerdo a lo descrito en la sección 2.2 y evitar, en la medida de lo posible, encender la bomba hidráulica con la electroválvula completamente cerrada (0% de apertura).
8. Una vez utilizado el equipo, cerrar el programa y apagar el sistema electrónico.

3. Resultados y discusión

En este capítulo se muestran los resultados del proyecto: el sistema electrónico, el tablero hidráulico y el software desarrollados. Además, se incluye información de las pruebas realizadas con este sistema, para evaluar su funcionamiento. Se discute acerca del desempeño del sistema y el trabajo a futuro sobre este proyecto.

3.1 Resultados

Se diseñó y construyó el banco hidráulico de pruebas con fines didácticos mostrado en la figura 34. Además, se realizó la comparación de la información de los sensores contra información obtenida por otros medios, y finalmente, se realizó un experimento común en las prácticas de Mecánica de Fluidos: observar la caída de presión y el flujo en una válvula de globo.



Figura 34. Banco hidráulico de pruebas.

3.1.1 Sistema electrónico

El sistema electrónico se presenta en la figura 35. Con referencia a la figura 35:

1. Es la etapa de potencia para la bomba hidráulica.
2. Es la etapa de potencia para el motor de la electroválvula.
3. Es la etapa de acondicionamiento de la señal de posición actual de la electroválvula.
4. Es la etapa de acondicionamiento para los sensores de presión.
5. Es el microcontrolador PIC18F4553 y comunicación USB.

6. Es el circuito de acondicionamiento para el sensor de flujo.
7. Es la fuente de ± 12 (V) 1 (A) para los circuitos de acondicionamiento.
8. Es la fuente de 12 (V) 3 (A) dedicada a la electroválvula y a la bomba hidráulica.

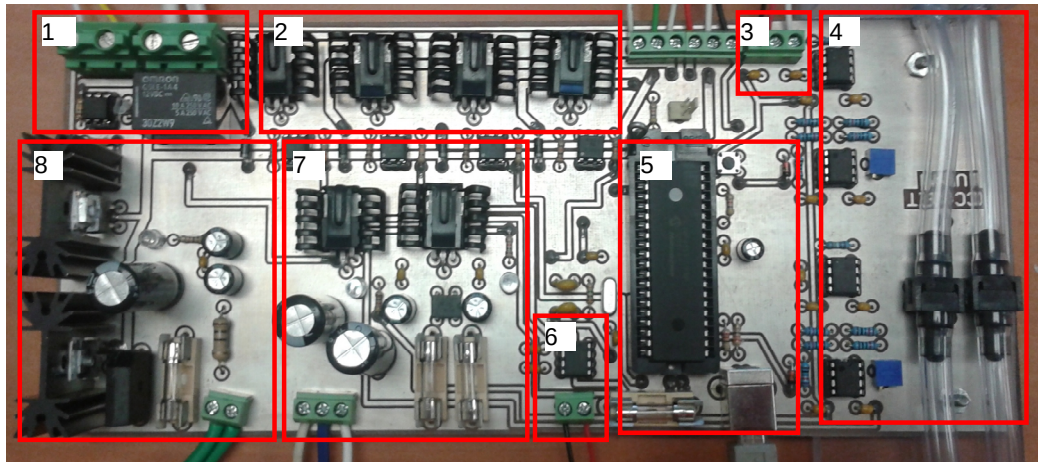


Figura 35. Sistema electrónico.

3.1.2 Tablero hidráulico

Se construyó un tablero hidráulico de material MDF para soportar las cinco líneas de tubería PVC y CPVC, figura 36. El tablero contiene los dispositivos de control de flujo (electroválvula y bomba hidráulica), la instrumentación con base en PC (transductores de presión, medidor de flujo, medidor de posición de apertura en la electroválvula), conectores rápidos, área de visualización de fluidos, accesorios y mangueras flexibles auxiliares

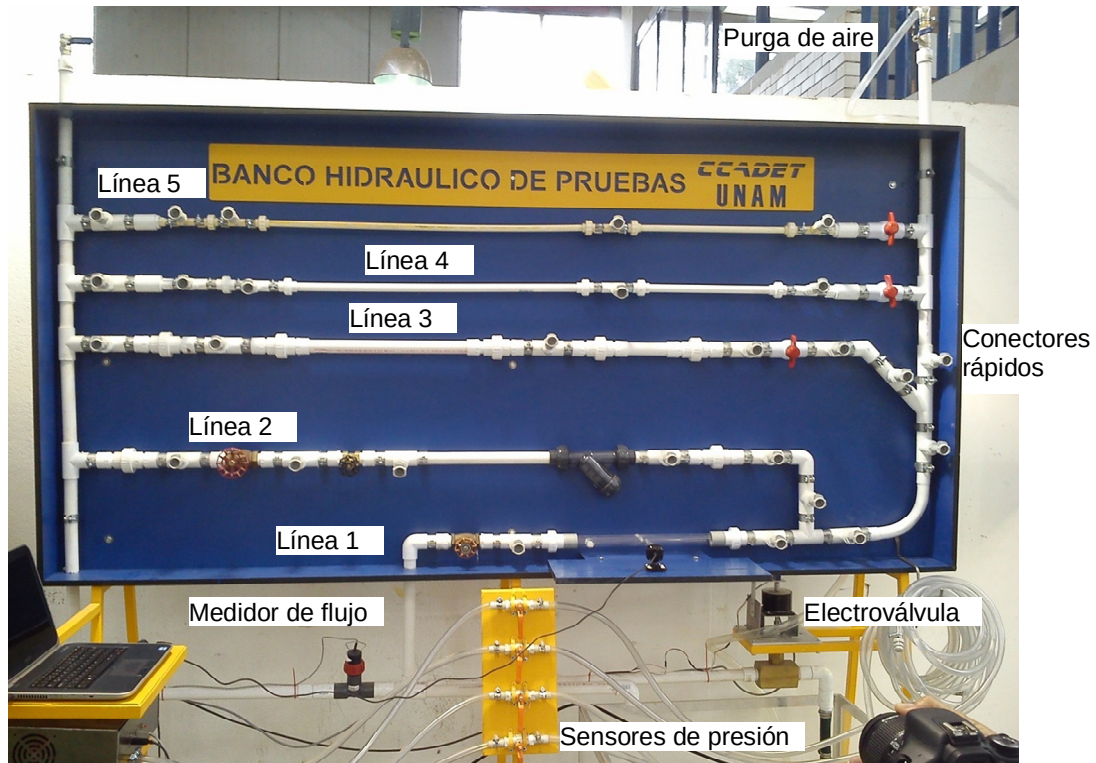


Figura 36. Tablero hidráulico.

3.1.3 Software de operación

Para registrar las variables del tablero hidráulico y transformarlas en valores coherentes para el usuario, además de controlar el gasto del fluido, se desarrolló el software de operación mostrado en la figura 37.

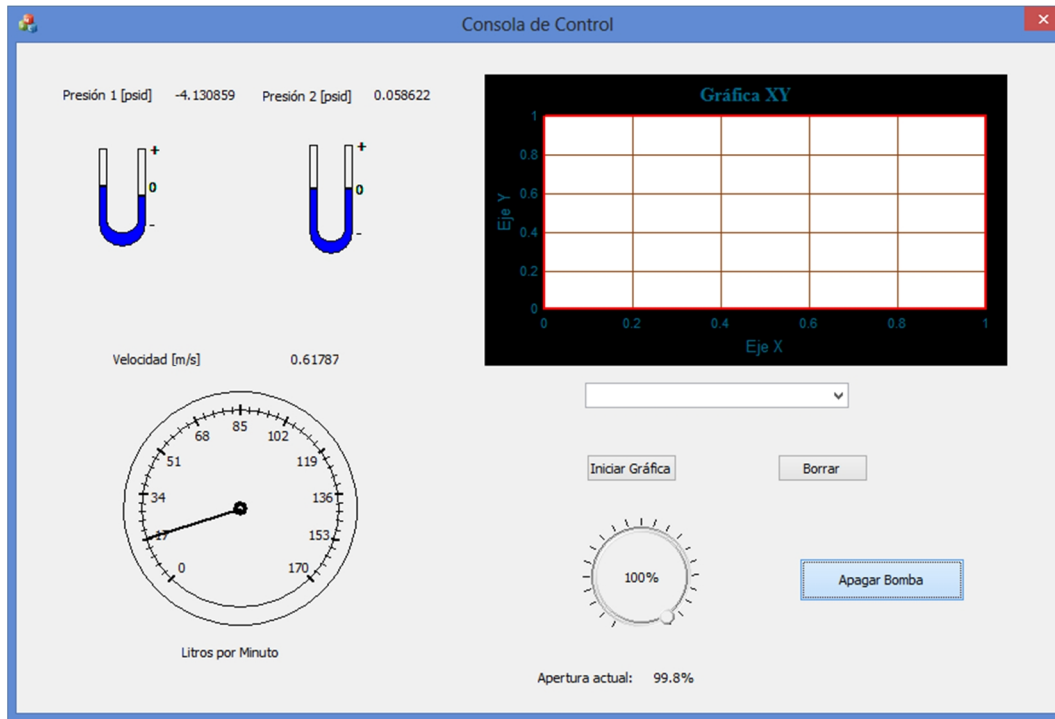


Figura 37. Software de operación en ejecución.

3.1.4 Calibración

Se realizaron dos procesos de calibración para evaluar el desempeño de los dispositivos de medición utilizados en el sistema electrónico desarrollado (sensores de presión y flujo). A continuación se presentan las pruebas realizadas.

Presión

Para la calibración del sensor de presión, se empleó un compresor de aire de 2.5 (hp) de Adir Herramientas y el manómetro incluido en éste como instrumento de referencia. Como se puede ver en la figura 38, la división mínima del manómetro de referencia es de 5 (psi) y su alcance de medición es de 200 (psi). Comparando estas características con los alcances de medición en el sistema electrónico a calibrar (± 15 psid y ± 30 psid) observamos que se trabajará en el extremo inferior del manómetro de referencia, lo cual ocasionará cierta incertidumbre, ya que representa una zona difícil de observar a simple vista.



Figura 38. Manómetro de referencia usado para calibración.

La prueba consiste en colocar el compresor a una presión de referencia, la cual se registra con el manómetro de referencia en uno de los extremos del sensor piezorresistivo del sistema electrónico y el otro extremo del sensor dejarlo abierto a la presión atmosférica. La presión de referencia se regula manualmente mediante la válvula de estrangulamiento del compresor. En las tablas 2 y 3 se muestran las mediciones realizadas, donde:

- P_M es la lectura tomada del manómetro mecánico, que se usa como referencia. Es expresada en (psi).
- P_S es el promedio de cinco lecturas realizadas con el sistema electrónico. Es expresada en (psi).
- $Error$ es la diferencia entre P_M y P_S en (psi).
- σ es la desviación estándar de las cinco lecturas.

P_M (psi)	Lectura 1 (psi)	Lectura 2 (psi)	Lectura 3 (psi)	Lectura 4 (psi)	Lectura 5 (psi)	P_S (psi)	Error (psi)	σ
-15	-14.99	-15	-15	-14.99	-14.99	-14.994	-0.006	0.253
-14	-14.5	-14.99	-14.99	-14.53	-14.39	-14.68	0.68	0.163
-12	-13.11	-13.15	-13.01	-12.78	-13.16	-13.042	1.042	0.377
-10	-10.72	-11.06	-11.09	-10.56	-10.56	-10.798	0.798	0.179
-8	-8.8	-8.48	-8.64	-8.76	-8.85	-8.706	0.706	0.473
-6	-7.06	-7.05	-6.66	-6.59	-6.34	-6.74	0.74	0.181
-4	-4.62	-5.02	-4.79	-4.63	-4.58	-4.728	0.728	0.022
-2	-2.18	-2.9	-2.38	-2.12	-2.73	-2.462	0.462	0.339
0	0.02	0.01	-0.03	0.007	-0.04	-0.0066	0.0066	0.456
2	2.44	2.52	2.59	2.23	2.45	2.446	-0.446	0.202

4	5.03	4.68	4.62	4.53	4.62	4.696	-0.696	0.205
6	6.58	6.28	6.34	6.79	6.72	6.542	-0.542	0.184
8	8.28	8.38	8.13	8.53	8.54	8.372	-0.372	0.124
10	9.8	10.51	10.18	10.01	10.25	10.15	-0.15	0.253
12	11.25	11.34	11.33	11.45	11.34	11.342	0.658	0.163
14	11.95	12.2	11.96	12.12	12.2	12.086	1.914	0.377
15	12.38	12.62	12.43	12.6	12.7	12.546	2.454	0.179

Tabla 2. Prueba con PX26-015DV ± 15 (psid).

P_M (psi)	Lectura 1 (psi)	Lectura 2 (psi)	Lectura 3 (psi)	Lectura 4 (psi)	Lectura 5 (psi)	P_s (psi)	Error (psi)	σ
-30	-29.5	-29.5	-29.97	-30	-29.9	-29.774	-0.226	0.005
-25	-26.42	-26.7	-26.39	-26.3	-26.6	-26.482	1.482	0.288
-20	-20.22	-21.07	-20.56	-20.12	-20.35	-20.464	0.464	0.158
-15	-15.72	-15.67	-15.65	-15.79	-16.09	-15.784	0.784	0.261
-10	-10.43	-10.33	-9.37	-9.55	-9.73	-9.882	-0.118	0.148
-5	-5.01	-4.77	-4.61	-4.9	-5.05	-4.868	-0.132	0.311
0	-0.01	-0.02	0.01	-0.05	-0.01	-0.016	0.016	0.182
5	4.7	4.95	5.46	5.23	5.49	5.166	-0.166	0.342
10	9.68	9.75	10.62	10.59	9.95	10.118	-0.118	0.027
15	15.09	14.78	14.99	14.96	14.58	14.88	0.12	0.135
20	18.52	18.5	18.23	18.51	18.07	18.366	1.634	0.194
25	21.26	20.94	20.94	20.78	20.85	20.954	4.046	0.226
30	22.76	22.65	22.58	22.48	22.46	22.586	7.414	0.173

Tabla 3. Prueba con PX26-030DV ± 30 (psid).

Las figuras 39 y 40 muestran las gráficas de presión de referencia contra el error calculado.

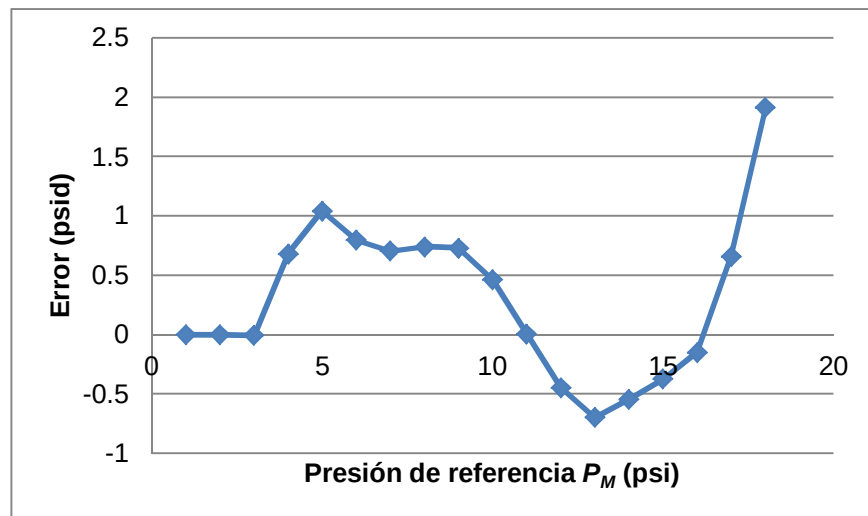


Figura 39. Evaluación del PX26-015D contra manómetro mecánico.

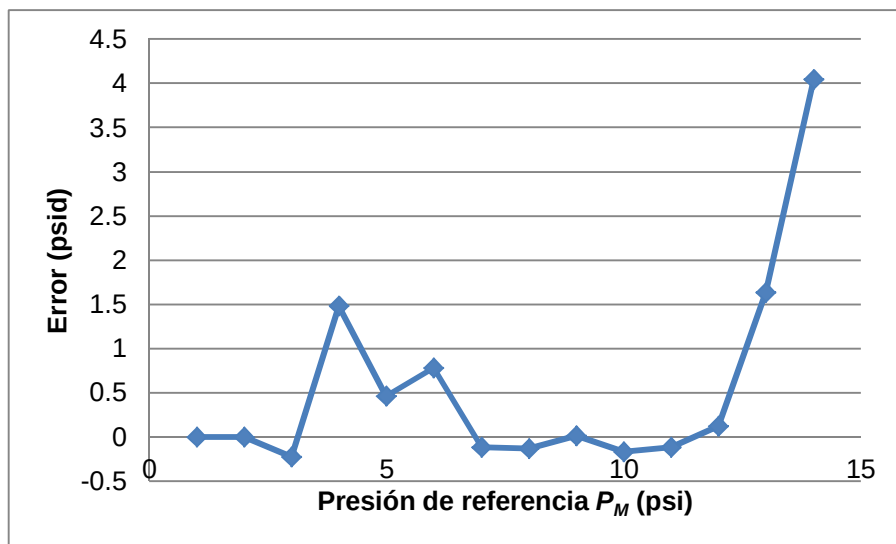


Figura 40. Evaluación del PX26-030D contra manómetro mecánico.

En ambas gráficas, se identificaron dos regiones: una donde el comportamiento varía menos, al 10% y otra región, menos confiable, donde se excede ese 10%, lo cual indica un comportamiento anómalo en uno de los extremos del rango del sensor de presión.

Se aprecia una desviación estándar máxima de 0.456 (psi) en los datos medidos del PX26-015D, y de 0.342 (psi) para los datos del PX26-030D, Lo cual indica una buena repetibilidad.

Para analizar este comportamiento anómalo, se realizó un experimento que tiene por objetivo observar detalladamente la etapa de acondicionamiento de señal para el sensor de presión. El experimento consiste en medir los voltajes a la salida del amplificador sumador del circuito de acondicionamiento para el PX26-030D (V_x) y en la entrada del canal de conversión del microcontrolador, es decir, en el cátodo del diodo Zener (V_2), como se muestra en la figura 41. Debido a que el PX26-015D y el PX26-030D poseen el mismo circuito, sólo se hizo la prueba con un solo sensor.

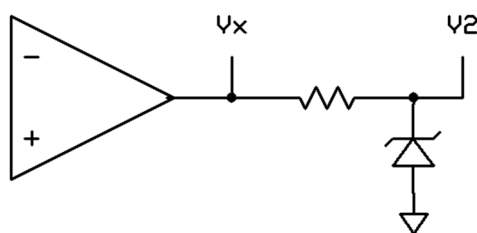


Figura 41. Comparación de V_x y V_2 .

En la tabla 4, se muestran los valores registrados para el experimento anteriormente descrito.

P_M (psi)	V_x (V)	V_2 (V)	Variación de voltajes $ V_x - V_2 $
-30	-0.45	-0.36	0.09
-25	0.173	0.171	0.002
-20	0.56	0.57	0.01

-15	1.36	1.36	0
-10	1.45	1.54	0.09
-5	2.068	2.02	0.048
0	2.497	2.493	0.004
5	3.059	3.058	0.001
10	3.39	3.37	0.02
15	3.96	3.81	0.15
20	4.395	4.045	0.35
25	4.94	4.27	0.67
30	5.27	4.36	0.91

Tabla 4. Datos recolectados de la medición de V_x y V_2 para una presión específica.

De la tabla 4 se aprecian variaciones muy marcadas en 15, 20, 25 y 30 (psi), lo que indica que el diodo Zener está conduciendo, distorsionando en este rango el voltaje que registra el microcontrolador.

Flujo

Para apreciar el desempeño del sensor de flujo, se realizó un experimento que consiste en recolectar el agua que atraviesa el circuito hidráulico durante cierto tiempo, y estimar el gasto másico de referencia ($\dot{m}_{ref}$) al pesar la cantidad de agua recolectada y compararlo contra el gasto másico determinado por el sistema electrónico ($\dot{m}_{med}$).

El gasto másico de referencia, $\dot{m}_{ref}$, se determina mediante la ecuación (12).

$$\dot{m}_{ref} = \frac{P}{T} \quad (12)$$

Donde:

- P es el peso medido en kilogramos.
- T es el tiempo en segundos transcurrido durante el llenado del recipiente.

La relación del gasto másico con la velocidad de flujo determinada por el sistema electrónico se da por la ecuación (13)

$$\dot{m}_{med} = \rho v A \quad (13)$$

Donde:

- $\dot{m}_{med}$ es el gasto másico experimental.
- ρ es la densidad del fluido.
- v es la velocidad del fluido determinada por el sistema electrónico.
- A es el área de la tubería donde se realiza la medición.

Para el experimento, se habilitó la circulación de agua exclusivamente por las líneas 1 y 2. Posteriormente, se realizaron dos condiciones de variación de flujo: colocando la válvula de descarga en la línea 1 abierta al 60% y abierta al 100%. El resto de las válvulas están completamente cerradas. Se realizaron veinte mediciones en este experimento.

Se toma a ρ como 1000 (kg/m³), y el área de la tubería A es 0.000464068 (m²).

Los resultados se muestran en las tablas 5 y 6 en donde el *Error* está definido por la ecuación (14).

$$Error = \frac{\left| \dot{m}_{med} - \dot{m}_{ref} \right|}{\left| \dot{m}_{med} \right|} 100(\%) \quad (14)$$

Número de prueba	<i>P</i> (kg)	<i>T</i> (s)	$\dot{m}_{med}$ (kg/s)	<i>v</i> (m/s)	$\dot{m}_{ref}$ (kg/s)	Error (%)
1	8.16	35	0.233	0.472	0.219	6.049
2	8.02	35.2	0.228	0.461	0.214	6.103
3	8.49	35.9	0.236	0.47	0.218	7.771
4	8.185	36.2	0.226	0.461	0.214	5.382
5	8.125	36.7	0.221	0.456	0.211	4.415
6	8.12	36.5	0.222	0.44	0.204	8.215
7	8.25	37.5	0.220	0.446	0.207	5.921
8	8.21	36.8	0.223	0.45	0.209	6.395
9	8.29	38.5	0.215	0.43	0.200	7.326
10	8.345	38.4	0.217	0.44	0.204	6.040
11	8.395	35.6	0.235	0.48	0.222	5.539
12	8.425	35.9	0.235	0.467	0.217	7.653
13	8.275	36.5	0.227	0.46	0.213	5.841
14	8.33	36.8	0.226	0.458	0.213	6.103
15	8.225	36.4	0.226	0.466	0.216	4.295
16	8.225	35.8	0.230	0.48	0.223	3.045
17	8.39	36.5	0.230	0.47	0.218	5.112
18	8.45	37.4	0.226	0.46	0.213	5.517
19	8.635	38.7	0.223	0.45	0.209	6.407
20	8.155	38.1	0.214	0.44	0.204	4.603

Tabla 5. Prueba de sensor de flujo, con válvula de descarga al 60% de apertura.

De la tabla 5 se aprecia que el error promedio es de 5.88%, el error máximo registrado es 8.21%, y el mínimo de 3.04% lo cual indica exactitud aceptable. Los datos obtenidos del sensor poseen una desviación estándar de 0.01386884 (m/s) lo cual indica buena repetibilidad.

Número de prueba	<i>P</i> (kg)	<i>T</i> (s)	$\dot{m}_{med}$ (kg/s)	<i>v</i> (m/s)	$\dot{m}_{ref}$ (kg/s)	Error (%)
1	8.57	25.4	0.337	0.71	0.329	2.345
2	8.3	24.4	0.340	0.72	0.334	1.774
3	8.67	25.7	0.337	0.72	0.334	0.956
4	8.62	25.3	0.341	0.72	0.334	1.932

5	8.63	25.5	0.338	0.72	0.334	1.271
6	8.755	25.7	0.341	0.7	0.325	4.642
7	8.4	24.8	0.339	0.71	0.329	2.723
8	8.28	24.4	0.339	0.713	0.331	2.494
9	8.47	25.2	0.336	0.73	0.339	0.791
10	8.33	24.5	0.340	0.71	0.329	3.092
11	8.54	25.3	0.338	0.72	0.334	1.013
12	8.54	25.3	0.338	0.72	0.334	1.013
13	8.51	25.1	0.339	0.71	0.329	2.818
14	8.21	25.4	0.323	0.7	0.325	0.501
15	8.42	24.7	0.341	0.71	0.329	3.345
16	8.65	25.5	0.339	0.72	0.334	1.500
17	8.32	24.6	0.338	0.71	0.329	2.579
18	8.34	24.4	0.342	0.71	0.329	3.603
19	8.34	24.9	0.335	0.71	0.329	1.628
20	8.6	25.5	0.337	0.71	0.329	2.303

Tabla 6. Prueba de sensor de flujo, con válvula de descarga al 100% de apertura.

De la tabla 6, se aprecia que el error promedio es 2.11%, el error máximo es de 4.64% y el mínimo es de 0.5% lo cual indica buena exactitud. Los datos obtenidos del sensor poseen una desviación estándar de 0.0074075 (m/s) lo cual indica buena repetibilidad.

Comparando ambas tablas, se aprecia un porcentaje de error menor a mayor porcentaje de apertura en la válvula de descarga, es decir, a mayor velocidad de flujo. Esto es apreciable en las figuras 42 y 43.

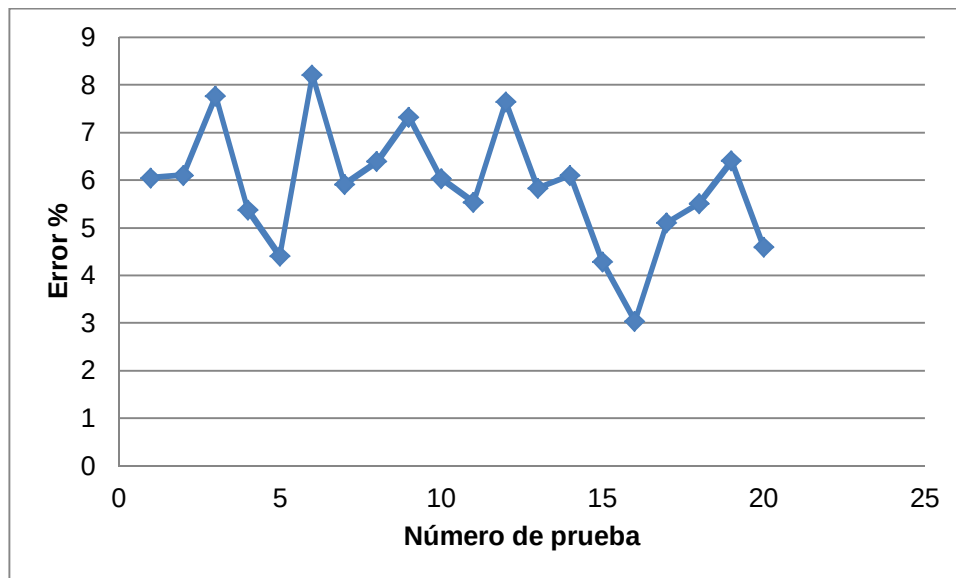


Figura 42. Estimación de error para el sensor de flujo FP-5300 con válvula al 60%.

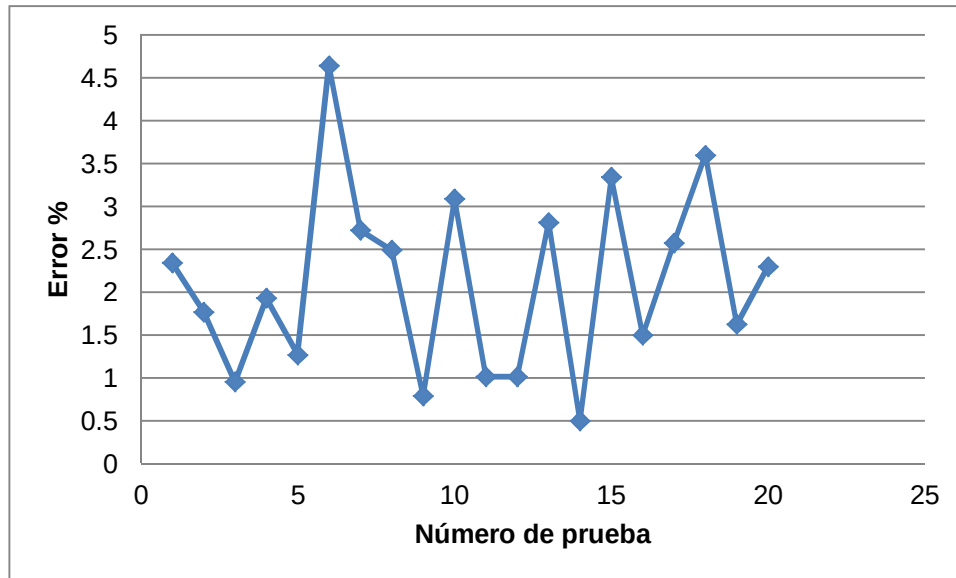


Figura 43. Estimación de error para el sensor de flujo FP-5300 con válvula al 100%.

3.1.5 Experimento del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I

Este experimento tiene como base la Práctica 8 de la materia “Mecánica de Fluidos I” de la carrera de Ingeniería Mecánica que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En forma adicional, se desarrollaron tres prácticas de laboratorio en total que incluyen resultados típicos. Las prácticas se muestran en el anexo C y sus archivos en conjunto con sus hojas de cálculo se encuentran en el directorio Practicas del CD anexo.

El primer experimento consistió en medir la diferencia de presión en la válvula de globo de la línea 2, contra el porcentaje de apertura de la válvula de globo, para diferentes porcentajes de apertura de la electroválvula, EV. La válvula de bola se coloca en posición abierta. La gráfica obtenida se observa en la figura 44. El segundo experimento consistió en medir la velocidad de flujo en el circuito hidráulico contra el porcentaje de apertura de la válvula de globo, para diferentes porcentajes de apertura de la electroválvula, EV. La válvula de bola se coloca en posición abierta. La gráfica obtenida se observa en la figura 45.

De la figura 44, se observa que a partir del 40% de apertura de la válvula de globo la caída de presión en el dispositivo es casi constante, no importando el gasto del fluido.

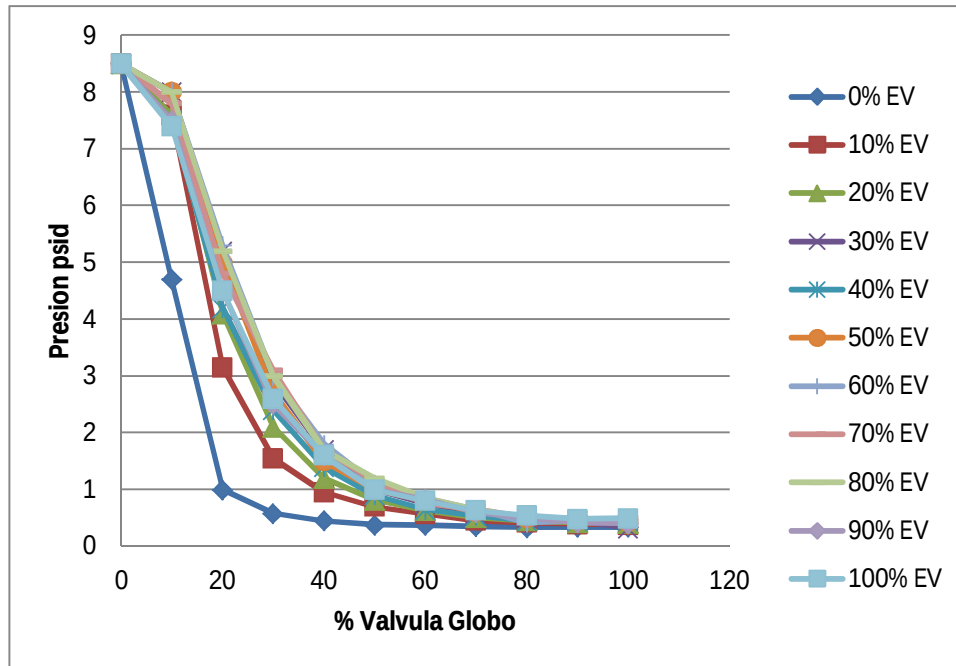


Figura 44. Presión diferencial en válvula globo contra su porcentaje de apertura.

De la figura 45, se aprecia que a partir del 40 de apertura en la válvula de globo la velocidad del flujo permanece casi constante, dependiendo del gasto del fluido.

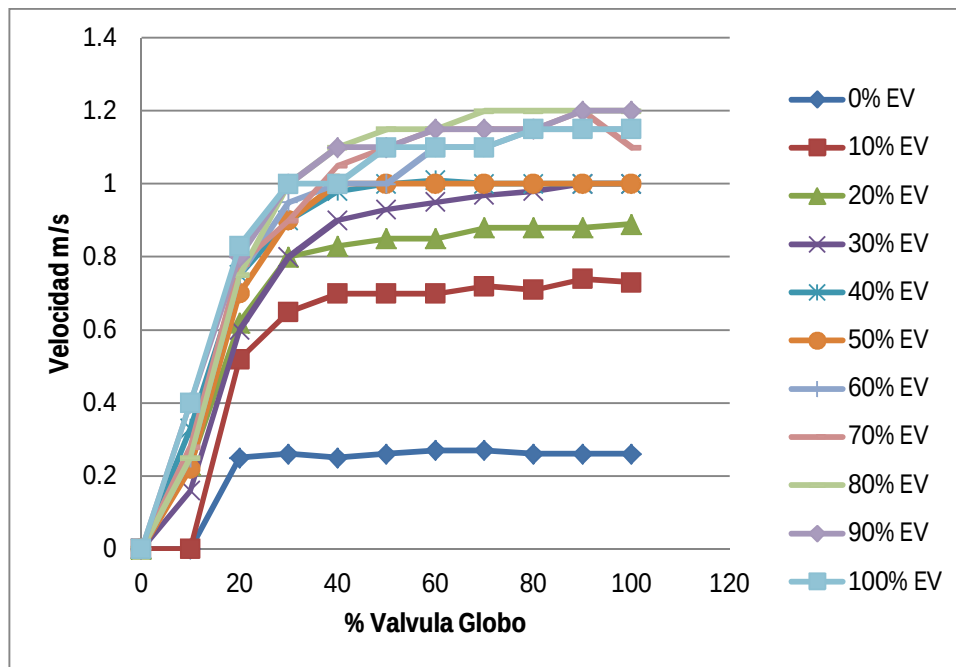


Figura 45. Velocidad de flujo contra apertura de la válvula de globo.

3.2 Discusión

Las mediciones realizadas de presión y flujo con el sistema electrónico del equipo desarrollado, son confiables ya que de los resultados de calibración se obtuvo una desviación estándar máxima de 0.456 (psi) para el PX26-015DV, de 0.342 (psi) para el PX26-030DV, y de 0.01386884 (m/s) para el FP-5300, lo

que asegura la reproducibilidad de las mediciones. Adicionalmente, los resultados obtenidos comprueban los parámetros especificados por los fabricantes de los sensores de presión y flujo. En nuestro concepto, el comportamiento del sistema electrónico y en general del banco hidráulico es apropiado para el desarrollo de las prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I.

No se agregaron rutinas de automatización para la realización de la práctica del laboratorio, ya que la intención del sistema es acercar a los estudiantes a la tecnología actual de instrumentación, no exentarlos de su trabajo en el desarrollo de las prácticas.

En caso de que los niveles de flujo sean consistentemente menores a lo que el sensor de flujo puede registrar, se recomienda emplear una bomba hidráulica de mayor presión que la actualmente instalada.

Para compensar el error causado por los diodos Zener en los circuitos de acondicionamiento de los sensores de presión, es posible emplear técnicas de linealización mediante software, sustituir el diodo Zener por uno cuyo voltaje Zener sea mayor, o investigar otras técnicas de limitación de voltaje para este circuito.

Los datos obtenidos en las mediciones de flujo y de presión demuestran la reproducibilidad de las mediciones. Las pruebas realizadas muestran el comportamiento del sistema con respecto a los métodos e instrumentos disponibles en el laboratorio.

La versatilidad del equipo desarrollado abre la puerta a que éste pueda ser usado como base para otros sistemas de medición y control hidráulicos. El diseño y construcción de un circuito para tales condiciones proveen de la experiencia necesaria para trabajar en sistemas más complejos. Además, con el software desarrollado, es posible extenderlo a aplicaciones más complejas, como puede ser un sistema de control realimentado.

3.3 Trabajo a futuro

El trabajo a futuro para este sistema se presenta en los siguientes puntos:

Instalación del prototipo funcional

Una vez construido el banco de pruebas, es necesario instalar el sistema hidráulico y electrónico en el Laboratorio de Termofluidos. Además, es necesario instalar el programa del sistema en una computadora, siguiendo los pasos descritos en el apartado 2.1 de este informe. Como el programa utiliza pocos recursos computacionales para la operación, se puede utilizar una computadora de bajo costo para el sistema. Se recomienda que ésta tenga dos puertos USB: uno para conectar el circuito electrónico y otro para conectar la cámara WEB.

Capacitar a los responsables de la operación del equipo

Es necesario entrenar al personal responsable para el buen funcionamiento del equipo. Además de instruirlos en el uso del sistema, hay que informarlos acerca de las precauciones que hay que tomar para evitar problemas. Estas precauciones son:

- Asegurarse de que las mangueras conectadas al sistema electrónico no tengan fugas.
- Asegurarse de que no existan fugas en los ramales del banco hidráulico.
- Verificar que las conexiones eléctricas no tengan daños.
- Evitar encender la bomba hidráulica mientras la electroválvula permanece completamente cerrada.

Se puede energizar al sistema electrónico antes de conectarlo a la computadora, ya que el sistema está diseñado para que no realice acción alguna hasta que sea reconocido por el sistema operativo.

Conclusiones

Se diseñó y construyó un banco hidráulico de pruebas para determinar caídas de presión en accesorios con fines didácticos. El sistema desarrollado es capaz de obtener información necesaria para el desarrollo de las prácticas de la materia Mecánica de Fluidos I, además que le permite a los estudiantes conocer la instrumentación electrónica usada hoy en día, ya que en la industria, éstos dispositivos no se encuentran a simple vista. Además, la electrónica y el software desarrollados dan pie al desarrollo de aplicaciones propias mucho más complejas para uso de las instituciones educativas. El sistema electrónico, tablero hidráulico y software de operación se construyeron con base en herramientas básicas de desarrollo (microcontroladores, tubería comercial y programación C++) lo cual facilita su eventual transferencia tecnológica.

Al no agregarse rutinas de automatización para la realización de los experimentos del Laboratorio de Mecánica de Fluidos, se logra acercar al estudiante a la tecnología actual de instrumentación, sin exentarlos de su trabajo en el desarrollo de las prácticas.

Se desarrollaron diversos experimentos de calibración del sistema y se desarrollaron tres prácticas enfocadas al uso del banco desarrollado. Se anexan las prácticas y sus respectivos resultados típicos.

Los experimentos realizados comprueban su buen desempeño y viabilidad para incorporar al banco hidráulico a los programas de estudio en Mecánica de Fluidos.

Del análisis de la información recolectada en los experimentos realizados, se identificaron oportunidades de mejora para trabajos futuros.

Especificaciones del equipo

Medición de presión. 2 sensores de presión diferencial. Alcance de medición: ± 15 psid, ± 30 psid. División mínima: 0.007psid, 0.014psid.

Medición de flujo. Alcance: 0.3 a 6 m/s.

Control de apertura en la electroválvula: Alcance: 0 a 100%. División mínima: 1%.

Gasto. 12,000l/h.

Fuente de energía. 127VAC.

Agradecimientos

Al proyecto PAPIIME PE103413 "Diseño e instrumentación de un banco hidráulico de pruebas para determinar caídas de presión en accesorios y tuberías" por el apoyo y financiamiento recibidos.

Al Departamento de Desarrollo de Prototipos del CCADET UNAM y al M. en I. Rigoberto Nava Sandoval por el apoyo recibido en la construcción del equipo.

Al Grupo de Ingeniería de Proceso del CCADET UNAM y al Dr. Gabriel Ascanio Gazca por la asesoría recibida.

Los archivos de diseño asistido por computadora se encuentran en la carpeta CADElectronica del CD anexo.

A.1 Diagrama esquemático

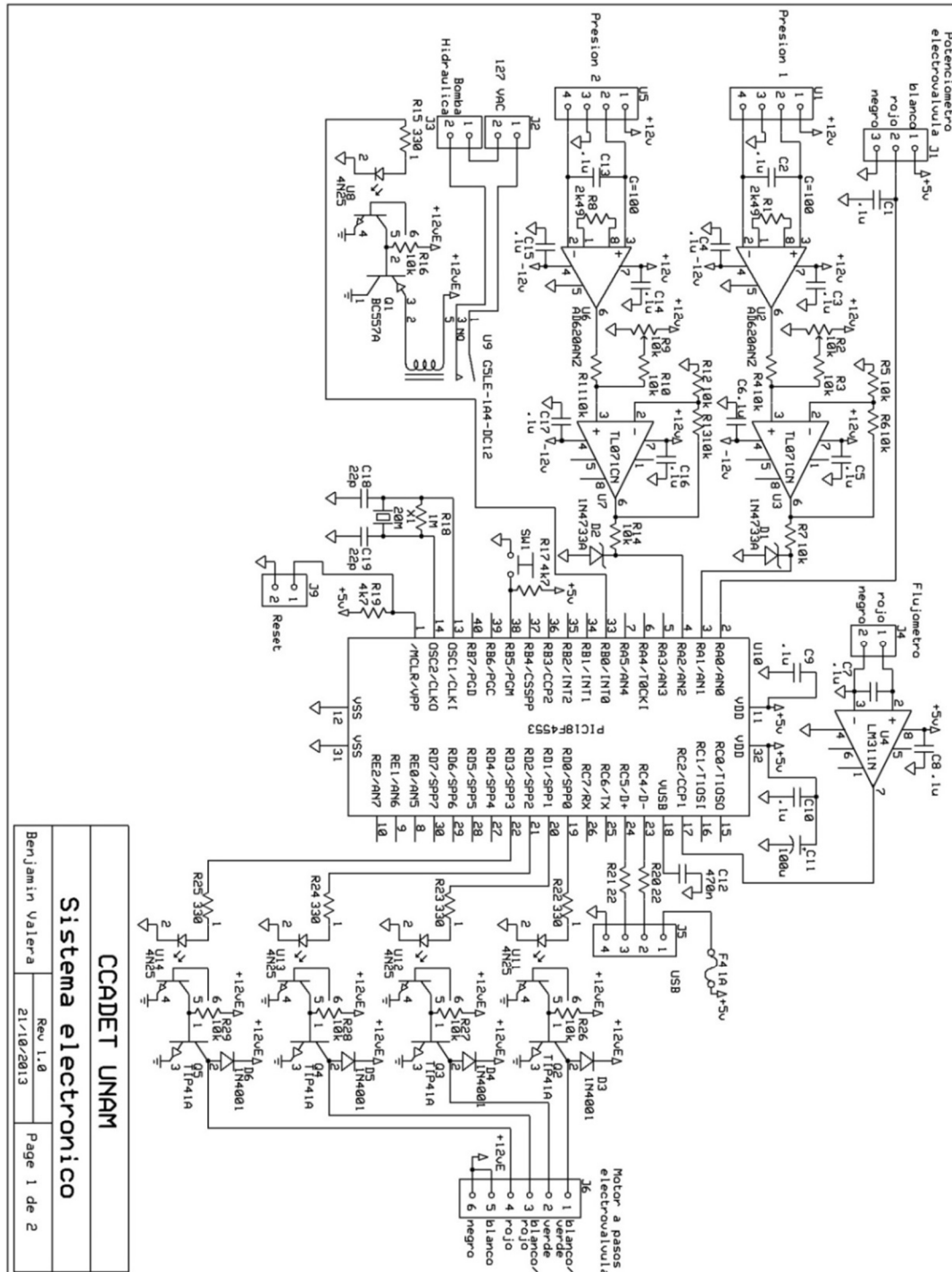


Figura A.1. Dibujo esquemático, microprocesador.

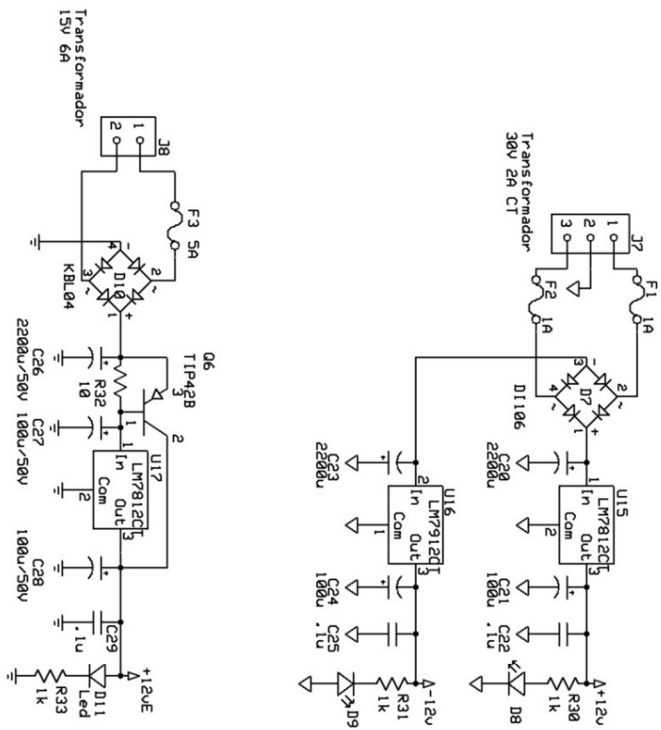


Figura A.2. Dibujo esquemático, fuentes de alimentación.

A.2 Circuito impresso

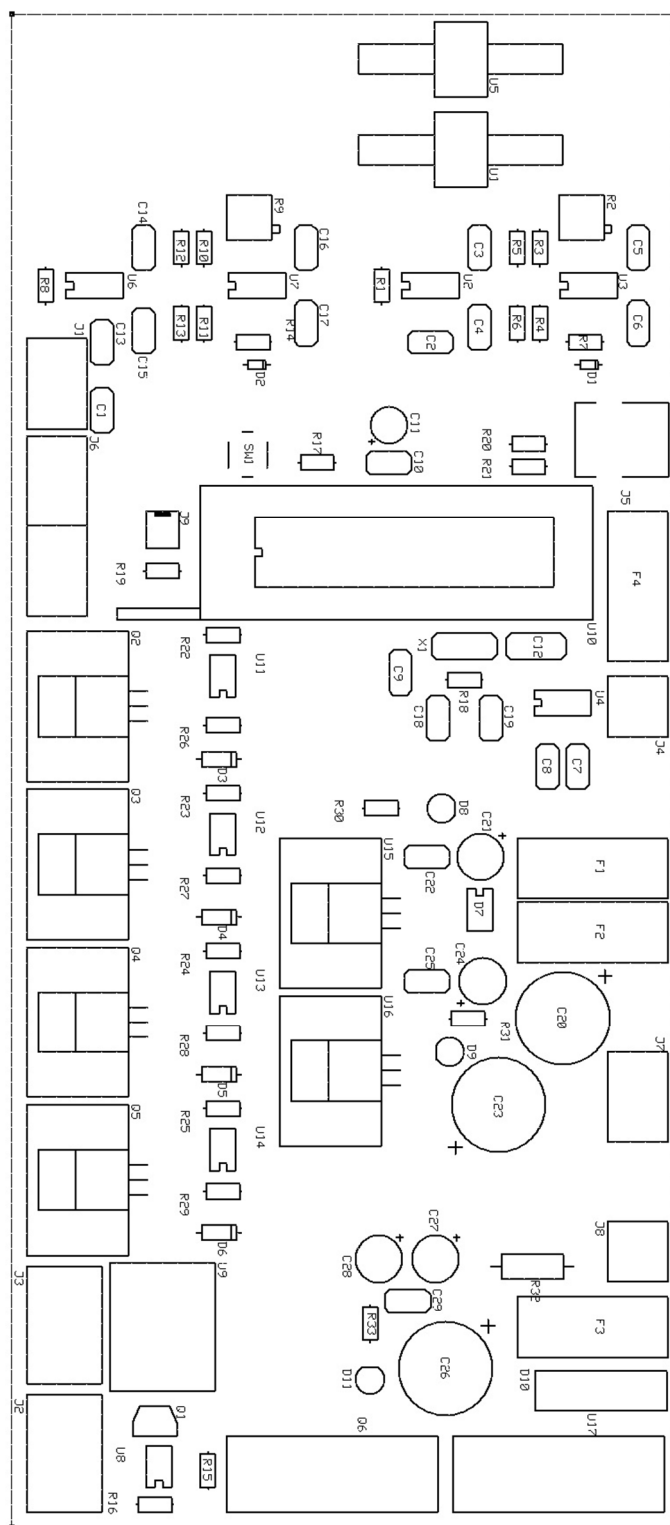


Figura A.3. Circuito impreso, mascarilla.

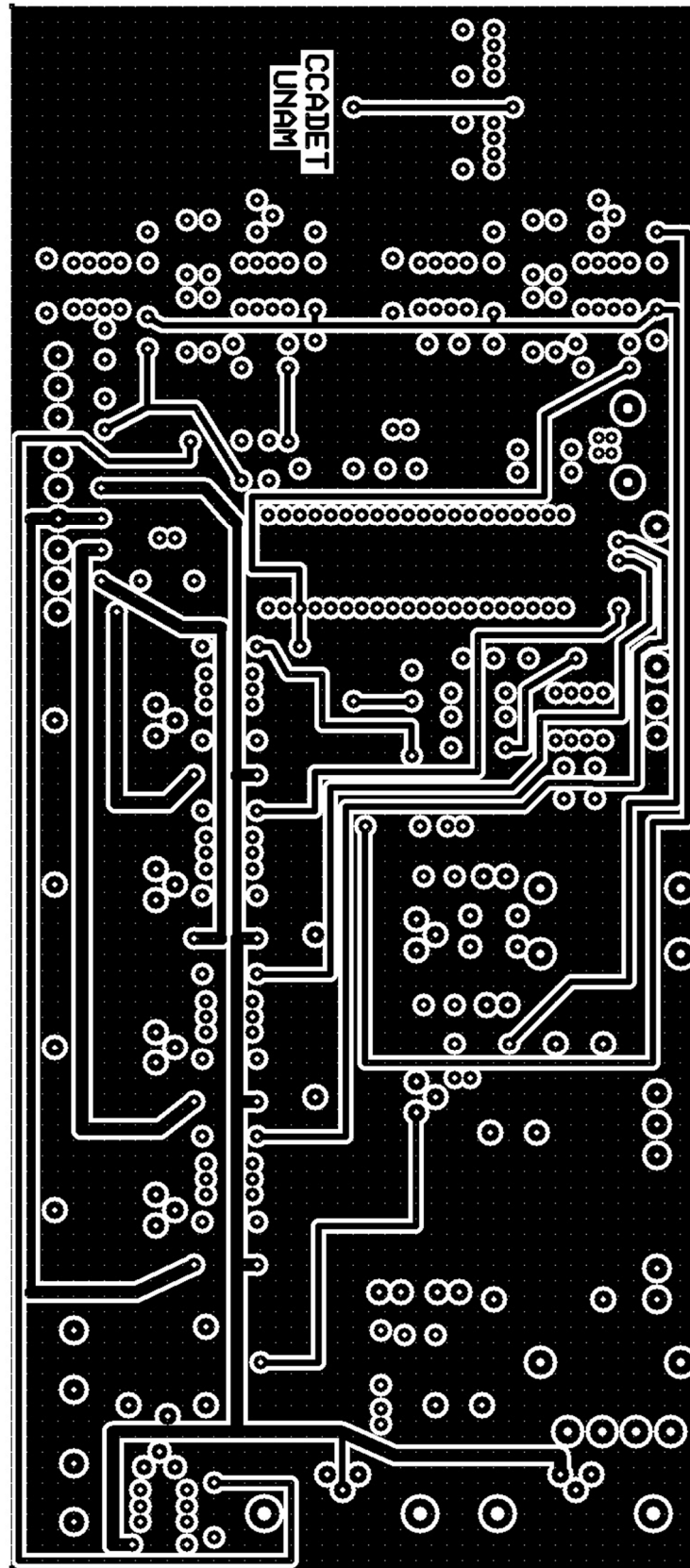


Figura A.4. Circuito impreso, componentes.

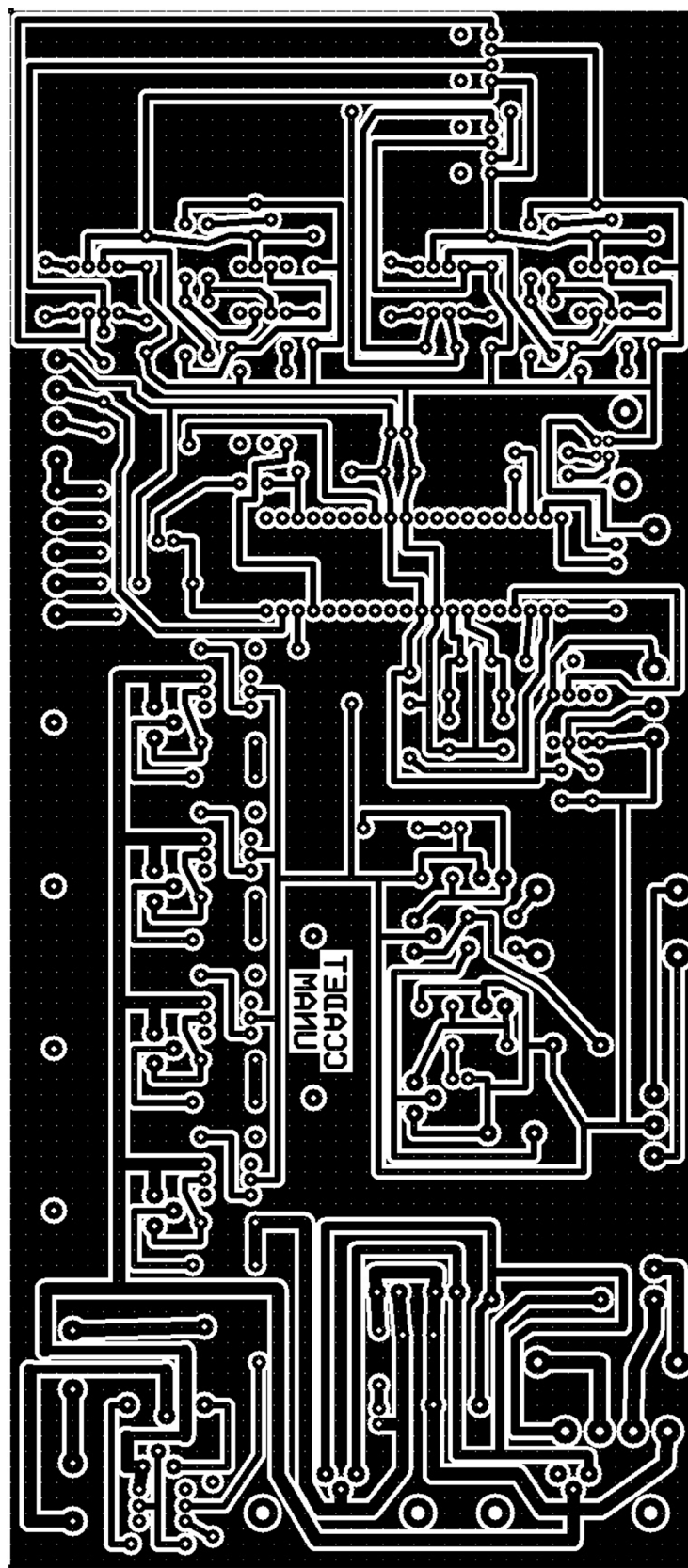


Figura A.5. Circuito impreso, soldadura.

A.3 Lista de partes

ID	Descripcion	Proveedor NumParte
C1	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C2	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C3	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C4	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C5	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C6	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C7	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C8	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C9	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C10	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C11	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/16V
C12	Capacitor monolítico 470n	Newark 46P6326
C13	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C14	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C15	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C16	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C17	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C18	Capacitor monolítico 22p	Newark 92K9515
C19	Capacitor monolítico 22p	Newark 92K9515
C20	Capacitor electrolítico 2200u	AG Electronica CE-2200/50V
C21	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C22	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C23	Capacitor electrolítico 2200u	AG Electronica CE-2200/50V
C24	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C25	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
C26	Capacitor electrolítico 2200u	AG Electronica CE-2200/50V
C27	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C28	Capacitor electrolítico 100u	AG Electronica CE-100/50V
C29	Capacitor monolítico .1u	Newark 95C0843
D1	Diodo zener 1N4733A	AG Electronica 1N4733A
D2	Diodo zener 1N4733A	AG Electronica 1N4733A
D3	Diodo rectificador 1N4001	Newark 10M8464
D4	Diodo rectificador 1N4001	Newark 10M8464
D5	Diodo rectificador 1N4001	Newark 10M8464
D6	Diodo rectificador 1N4001	Newark 10M8464
D7	Puente rectificador 1A/600V DI106	Newark 96K8607
D8	Led	Steren 5/ROJO ULTRA
D9	Led	Steren 5/AZUL ULTRA
D10	Puente rectificador 4A/400V KBL04	Newark 76K6344
D11	Led	Steren 5/AZUL ULTRA
F1	Portafusible europeo	Ultimo recurso
F1	Fusible 1A	Newark 26K7739
F2	Portafusible europeo	Ultimo recurso
F2	Fusible 1A	Newark 26K7739
F3	Portafusible europeo	Ultimo recurso
F3	Fusible 5A	Steren FEUR 5
F4	Portafusible europeo	Ultimo recurso
F4	Fusible 1A	Newark 26K7739
J1	Terminal con 3 tornillos	Steren TRT-03
J1	Potenciómetro 10 vueltas 20k	AG Electronica 3540S-1-203
J1	Jack 3 vias Cannon	Steren 250-705
J1	Plug 3 vias Cannon	Steren 250-710

J1	Cable 3 vias (6m)	Steren M2X22-305
J2	Conector con 2 tornillos	Newark 71C4093
J2	Receptáculo AC entrada	Newark 45P4893
J2	Interruptor 1 polo 1 tiro	Newark 96C8841
J2	Cable de alimentación AC	Steren 3X18E-2.5
J3	Conector con 2 tornillos	Newark 71C4093
J3	Receptaculo AC salida	Newark 81C9028
J4	Terminal con 2 tornillos	Steren TRT-02
J4	Jack stereo 3.5mm	Steren 250-535
J4	Plug stereo 3.5mm	Steren 250-150
J5	Conector USB Tipo B	Newark 10R6833
J5	Cable USB	Newark 55M6810
J6	Dos terminales con 3 tornillos	Steren TRT-03
J6	Jack DB9	Steren 500-109
J6	Plug DB9	Steren 500-009
J6	Cubierta DB9	Steren 500-409
J6	Cable 6 vias	Ultimo recurso
J7	Terminal con 3 tornillos	Steren TRT-03
J8	Terminal con 2 tornillos	Steren TRT-02
J9	Poste vertical molex 2 pines	Ultimo recurso
J9	Caja molex 2 pines	Ultimo recurso
J9	Push botton a chasis	Steren AU-104R
Q1	Transistor BC557A	AG Electronica BC557A
Q2	Transistor TIP41A	Newark 01H1005
Q2	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
Q3	Transistor TIP41A	Newark 01H1005
Q3	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
Q4	Transistor TIP41A	Newark 01H1005
Q4	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
Q5	Transistor TIP41A	Newark 01H1005
Q5	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
Q6	Transistor TIP42B	AG Electronica TIP42B
Q6	Disipador de calor	Steren TO-300
R1	Resistencia metálica 2k49	AG Electronica RP-2K49
R2	Trim pot 10k 10 vueltas	Newark 62J1261
R3	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R4	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R5	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R6	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R7	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R8	Resistencia metálica 2k49	AG Electronica RP-2K49
R9	Trim pot 10k 10 vueltas	Newark 62J1261
R10	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R11	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R12	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R13	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R14	Resistencia metálica 10k	Newark 58K3797
R15	Resistencia de carbón 330	Steren R330 1/4
R16	Resistencia de carbón 10k	Steren R10K 1/4
R17	Resistencia de carbón 4k7	Steren R4K7 1/4
R18	Resistencia de carbón 1M	Steren R1M 1/4
R19	Resistencia de carbón 4k7	Steren R4K7 1/4
R20	Resistencia de carbón 22	Steren R22 1/4
R21	Resistencia de carbón 22	Steren R22 1/4
R22	Resistencia de carbón 330	Steren R330 1/4
R23	Resistencia de carbón 330	Steren R330 1/4

R24	Resistencia de carbón 330	Steren R330 1/4
R25	Resistencia de carbón 330	Steren R330 1/4
R26	Resistencia de carbón 10k	Steren R10K 1/4
R27	Resistencia de carbón 10k	Steren R10K 1/4
R28	Resistencia de carbón 10k	Steren R10K 1/4
R29	Resistencia de carbón 10k	Steren R10K 1/4
R30	Resistencia de carbón 1k	Steren R1k 1/4
R31	Resistencia de carbón 1k	Steren R1k 1/4
R32	Resistencia de carbón 10	Steren R10 1
R33	Resistencia de carbón 1k	Steren R1k 1/4
SW1	Push botton a circuito impreso	Steren AU-101
U1	Sensor diferencial de presion	Omega PX26-015DV
U2	AD620ANZ	Newark 59K4387
U2	Base 8 pines	Newark 52K3254
U3	TL071CN	Newark 89K1100
U3	Base 8 pines	Newark 52K3254
U4	LM311N	Newark 89K0675
U4	Base 8 pines	Newark 52K3254
U5	Sensor diferencial de presion	Omega PX26-030DV
U6	AD620ANZ	Newark 59K4387
U6	Base 8 pines	Newark 52K3254
U7	TL071CN	Newark 89K1100
U7	Base 8 pines	Newark 52K3254
U8	4N25	Newark 88K1384
U8	Base 6 pines	Newark 16M2650
U9	G5LE-1A4-DC12	Newark 36K7449
U10	PIC18F4553	Newark 54M5025
U10	Base 40 pines ZIF	AG Electrónica ZIF-40
U11	4N25	Newark 88K1384
U11	Base 6 pines	Newark 16M2650
U12	4N25	Newark 88K1384
U12	Base 6 pines	Newark 16M2650
U13	4N25	Newark 88K1384
U13	Base 6 pines	Newark 16M2650
U14	4N25	Newark 88K1384
U14	Base 6 pines	Newark 16M2650
U15	LM7812CT	Newark 86K1600
U15	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
U16	LM7912CT	Newark 41K6357
U16	Disipador de calor	Steren TO-220 C/C
U17	LM7812CT	Newark 86K1600
U17	Disipador de calor	Steren TO-300
X1	20M	Newark 96F2832
	Potenciómetro de 20 k	AG Electrónica 3540S-1-203
	Bomba hidráulica sumergible Karcher SCP 12000	Karcher 1.645-179.0
	Sensor de flujo	Omega FP-5300
	Electroválvula	Omega PV34-B
	Transformador 30 V 2 A con tap central	Steren TR12-500
	Transformador 15 V, 6 A	Transformadores Ávila
	Tubería y accesorios hidráulicos de PVC	Home Depot
	Computadora Lap Top Dell NEW Inspiron 14z Ultrabook	Forlac Asesores 225-2951
	Herramientas diversas	Varios
	Materiales para la construcción del banco hidráulico	Varios

Anexo B Tablero hidráulico

Los archivos de diseño asistido por computadora se encuentran en la carpeta CADTablero del CD anexo.

B.1 Planos de construcción

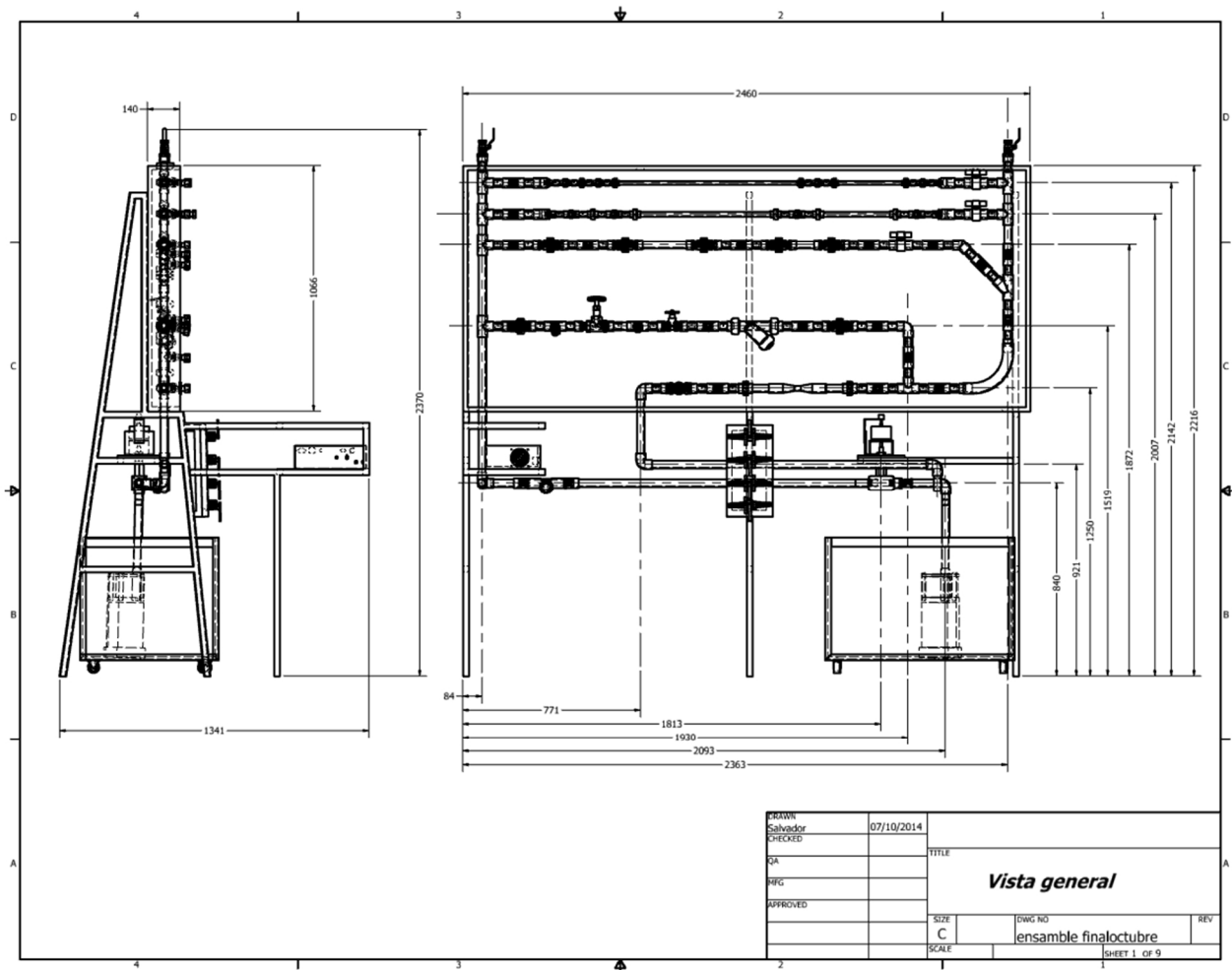


Figura B.1. Vista general.

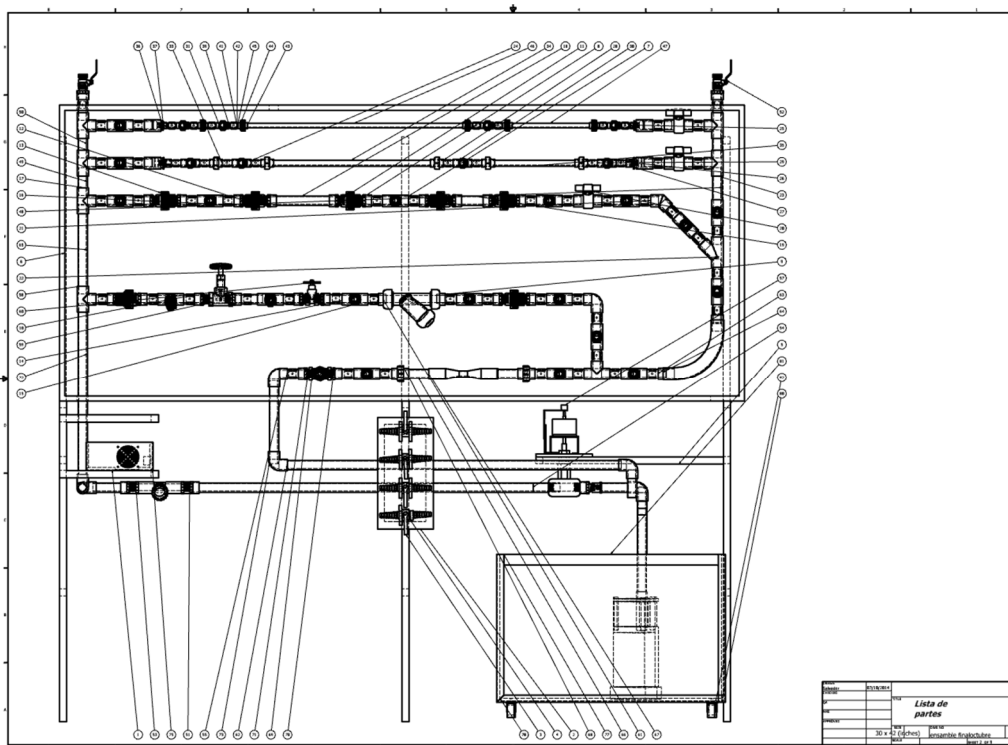


Figura B.2. Número de partes.

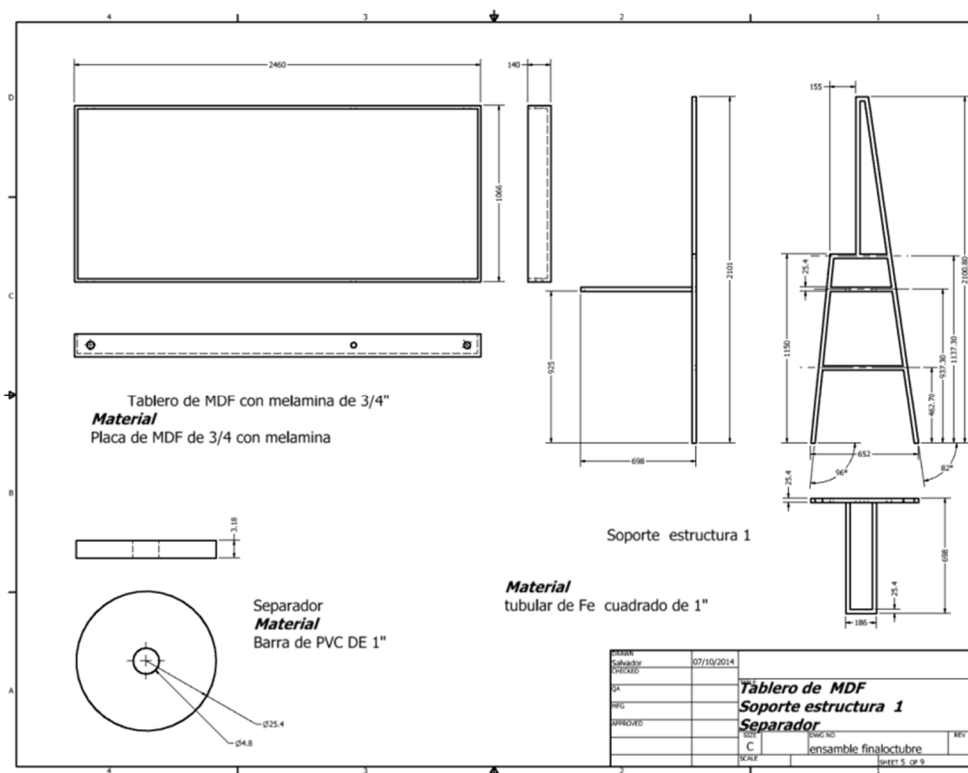


Figura B.3. Tablero, estructura de soporte 1 y separadores.

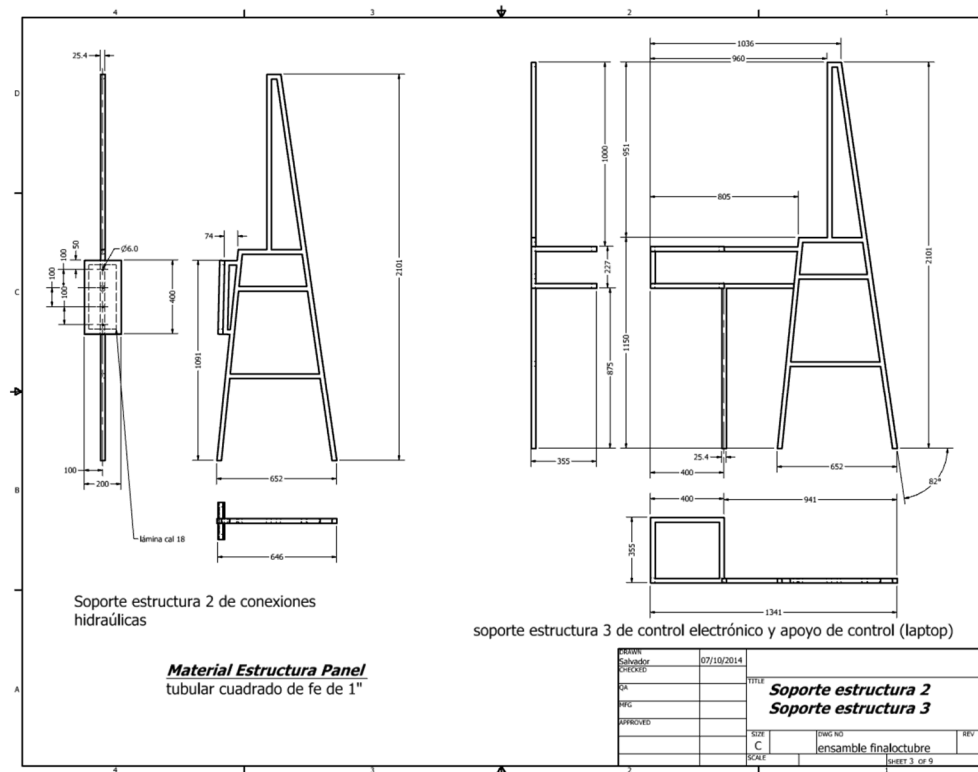


Figura B.4. Estructuras de soporte 2 y 3.

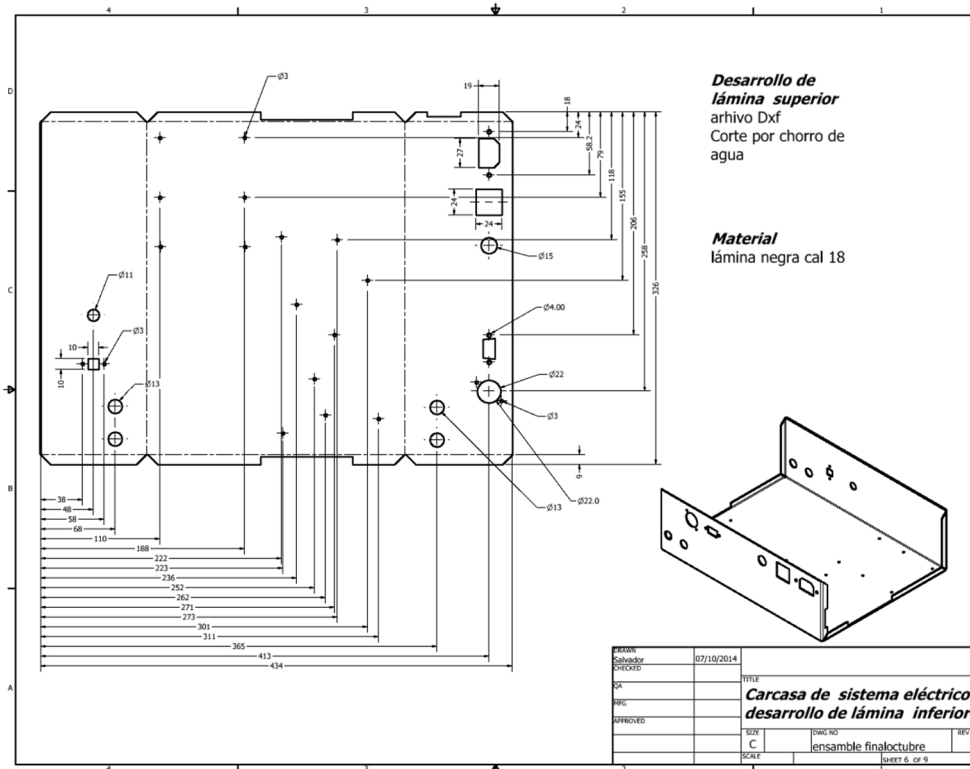


Figura B.5. Carcasa inferior.

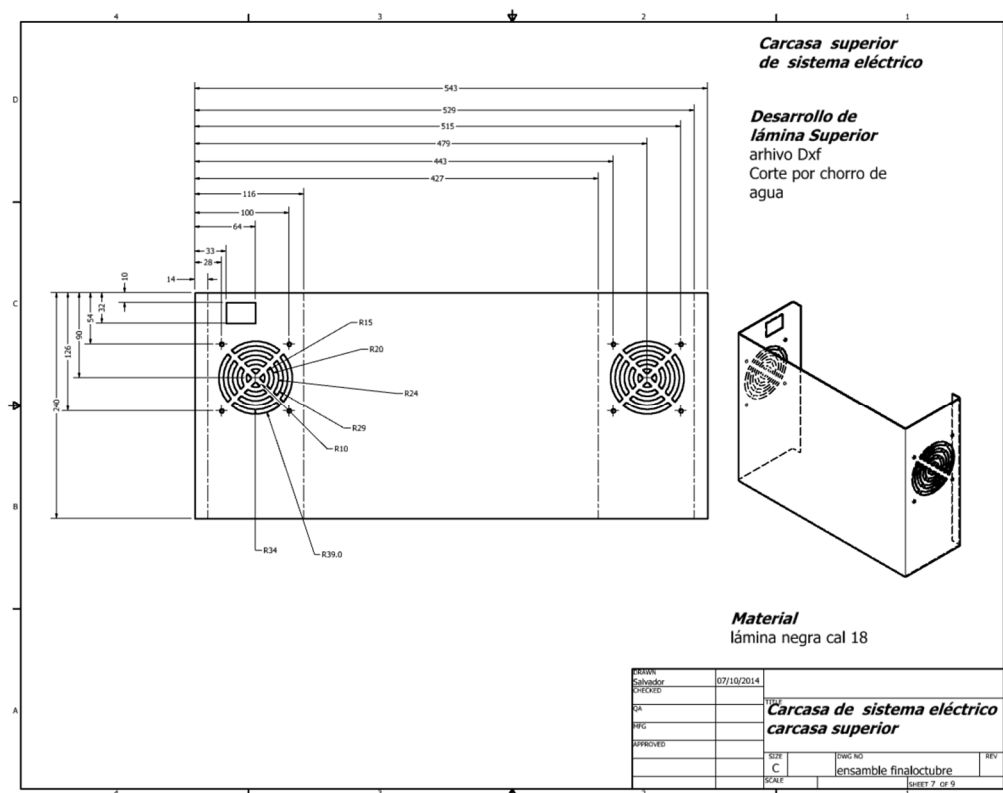


Figura B.6. Carcasa superior.

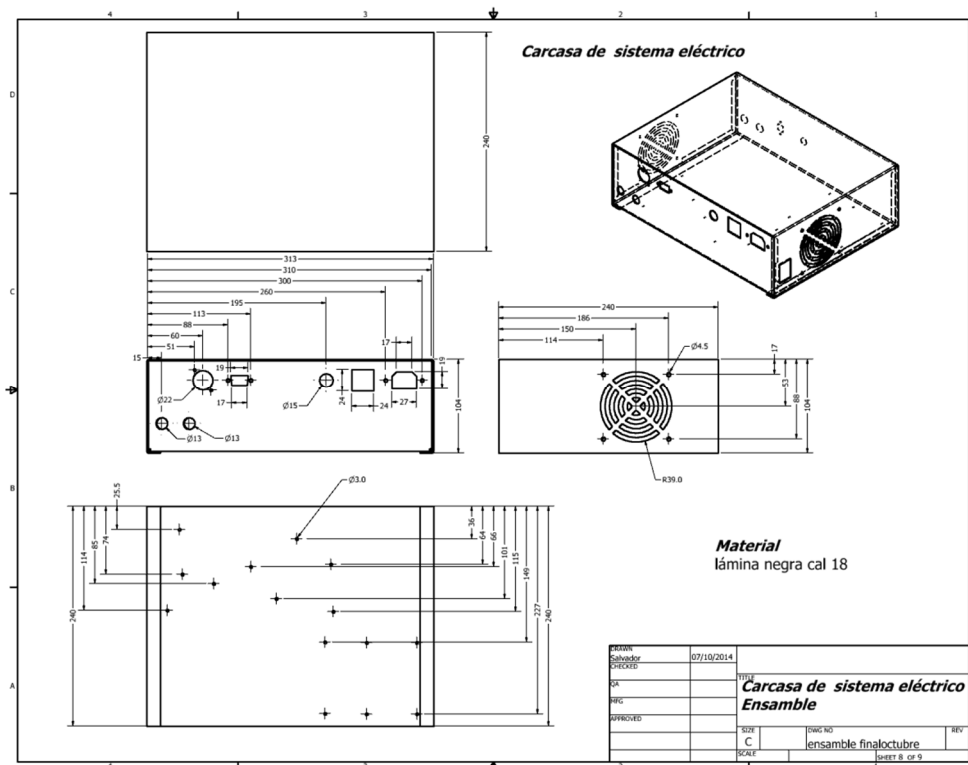


Figura B.7. Ensamble de la carcasa.

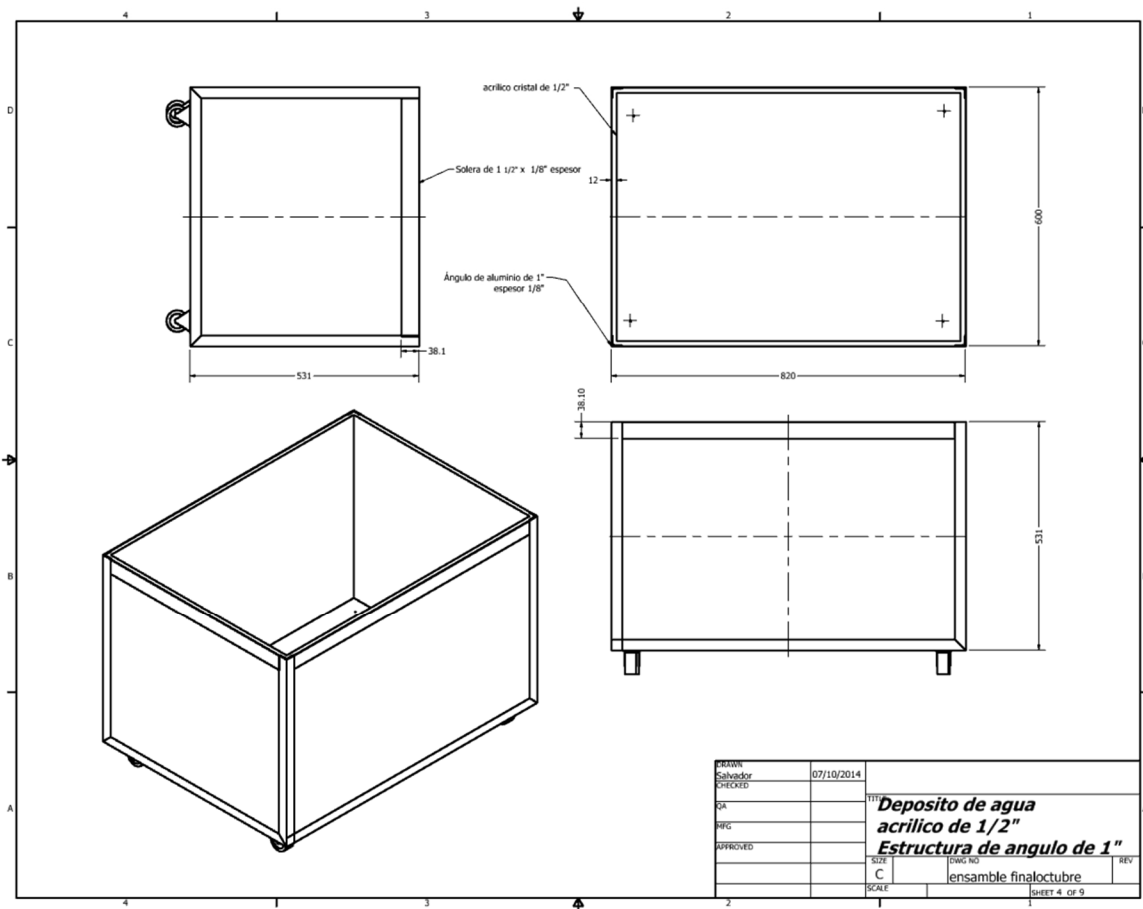


Figura B.8. Depósito de agua y estructura de aluminio.

B.2 Lista de partes

Numero	Cantidad	Nombre de la parte	Descripción
1	1	Soporte de la estructura 2	tubular cuadrado de 1"
2	1	soporte estructura central	tubular cuadrado de 1"
3	4	conector manguera	PVC comercial
4	8	conector fijación manguera	comercial
5	1	soporte de estructura1	tubular cuadrado de 1"
6	1	tablero	MDF 3/4"
7	34	tubo de 1in X 135.2	comercial
8	18	cople roscado 2	comercial
9	17	tubo de 1.5in X 60mm	comercial
10	45	Soporte de 1in	
11	7	pieza 1 brida 1 plg	comercial
12	7	pieza 2 brida 1plg	comercial
13	7	pieza 3 brida 1plg	comercial
14	19	Te 1 plg 12	comercial
15	20	cople buschen reducción 0.5 plg 10	comercial
16	19	conector rápido 10	comercial
17	1	Te 1 plg 1	comercial
18	1	tubolargolinea2lisa	comercial

19	1	tubocortolinea2lisa	comercial
20	3	válvula esfera	comercial
21	1	medio codo 1 plg 1	comercial
22	1	cofle Y 1plg 1	comercial
23	4	Te 1 plg.	comercial
24	16	soporte media	comercial
25	4	cofle 1plg 1	comercial
26	2	cofle roscado hembra 1	comercial
27	2	cofle roscado macho plg 1	comercial
28	8	tuboparamedia73.2	comercial
29	4	Te 0.5plg	comercial
30	4	cofle roscado 0.5plg	comercial
31	8	conector rápido	comercial
32	4	tuboparamedia39.6	comercial
33	5	brida .5plg 5	comercial
34	1	tuboparamedia300	comercial
35	1	tuboparamedia150	comercial
36	2	cofle reducción a 0.5plg roscado	comercial
37	2	cofle roscado 0.5plg cpvc	comercial
38	4	cofle roscado media cpvc	comercial
39	4	Te media cpvc	comercial
40	4	tuboparacpvc27	comercial
41	8	tuboparacpvc57	comercial
42	8	Tubo media soportecpvc	comercial
43	5	pieza1 brida media cpvc	comercial
44	5	pieza 2 brida media cpvc	comercial
45	5	pieza 3 brida media cpvc	comercial
46	1	tuboparacpvcLARGO	comercial
47	1	tuboparacpvcCORTO	comercial
48	1	tuboconectalineaa3conlinea2	comercial
49	1	tuboconectalineaa3conlinea2izquierdo	comercial
50	2	tuboconectalineaa4conlinea3	comercial
51	5	cofle roscado 1plg 5	comercial
52	2	válvula de esfera de latón	comercial
53	1	flujo metro	comercial
54	2	tubopulgadauneelectrovalvulayflujometro	comercial
55	4	codo 2	comercial
56	1	tubopulgadasalidadelplanoprincipal	comercial
57	1	Electro válvula	comercial
58	2	Te 1 plg 2	comercial
59	1	válvula COLLINGNON	comercial
60	1	Válvula 200 WOG	comercial
61	1	FILTRO	comercial
62	3	codo 1	comercial
63	2	cofle 1plg 2	comercial
64	1	codo grande	comercial
65	1	tuboconectalineaa2coninstrumentos	comercial

66	2	tubopulgadaexperimentos	comercial
67	1	tubopulgadaventuri	comercial
68	2	brida 1plg 2	comercial
69	1	válvula grande	comercial
70	1	cofle conexión roscado 1	comercial
71	1	cofle roscado 1	comercial
72	1	tubopulgadaconectalineas	comercial
73	2	tubopulgadadesague	comercial
74	1	carcasa inferior 1	comercial
75	1	carcasa superior	comercial
76	1	bomba sumergible	comercial
77	1	cuba de policarbonato	comercial
78		AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 31.3385826771654	Angle Steel
79		AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 22.6771653543307	Angle Steel
80		AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 20.3937007874016	Angle Steel
81		solera1	comercial
82	4	llantas	comercial

Anexo C Prácticas de laboratorio

Práctica 1. Pérdidas en tuberías

Objetivo

Verificar el comportamiento de las pérdidas de presión en tuberías.

Equipo de laboratorio

Banco hidráulico de pruebas.

Contenido del reporte

1. Nombre y objetivo de la práctica.
2. Desarrollo breve (3 páginas máximo) sobre los conceptos básicos relacionados con la práctica: pérdidas de carga en tuberías, análisis dimensional, flujo en tuberías, gasto, ecuaciones de pérdidas en flujo laminar, ecuación de Nikuradse, ecuación de Blasius, ecuación de Colebrook, ecuaciones explícitas.
3. Descripción del equipo utilizado en el laboratorio.
4. Presentación de los datos experimentales obtenidos.
5. Presentación de las gráficas de resultados obtenidos.
6. Discusión de resultados.
7. Conclusiones.
8. Bibliografía.

Antecedentes

Práctica de laboratorio: Medición de presión (manometría).

Anexo D: Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas.

Observaciones generales

- La práctica se desarrolla en el banco hidráulico de pruebas. Para su buen desarrollo se recomienda utilizar el manómetro de menor alcance, Presión 1 ± 15 psid, ya que las caídas de presión típicas para este experimento oscilan entre 0.5 a 6 psid.
- Debido a las variaciones en las lecturas de presión, se recomienda reportar un promedio visual de las lecturas con dos dígitos a la derecha del punto decimal.
- El banco está limitado principalmente en cuanto al alcance del gasto (12,000 l/h). Aun cuando las tuberías de PVC del banco pueden considerarse lisas, se debe tener cuidado ya que esto se aplica más bien a tuberías de vidrio y acrílico.
- Se recomienda complementar la práctica utilizando el banco con las tres opciones de diámetros de tuberías: $\frac{1}{2}$ " PVC, $\frac{1}{4}$ " PVC y $\frac{1}{4}$ " CPVC.

Experimento 1: Caída de presión en tramo de tubería de longitud constante

Desarrollo

Realizar el procedimiento "Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas (Anexo D)".

Realizar las conexiones hidráulicas que se muestran en la figura C.1.



Figura C.1. Diagrama de conexiones para medir la caída de presión en el tramo largo de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ ".

En el software de operación, establecer la apertura de la electroválvula al valor inicial de 10% y encender la bomba.

Continuar el experimento para completar los valores de la tabla C.1. Esperar aproximadamente 60 s entre tomas de lecturas con el propósito de estabilizar las mediciones

Lectura	Apertura electro-válvula %	Presión 1 psid	Velocidad m/s
1	10		
2	20		
...	...		
10	100		

Tabla C.1. Caída de presión en tramo de tubería PVC de $\frac{1}{2}$ " de longitud constante.

Experimento 2: Caída de presión en tramo de tubería de longitud variable

Desarrollo

Realizar el procedimiento "Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas (Anexo)".

Con la misma configuración de válvulas de la figura C.1, realizar las conexiones hidráulicas que se muestran en la figura C.2.



Figura C.2. Diagrama de conexiones para medir la caída de presión en los tramos 1, 2 y 3 de la tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ ".

En el software de operación, establecer la apertura de la electroválvula al valor fijo de 50% y encender la bomba.

Continuar el experimento para completar los valores de la tabla C.2. Esperar aproximadamente 20 s entre tomas de lecturas con el propósito de estabilizar las mediciones

Lectura	Tramo de tubería	Presión 1 psid	Velocidad m/s
1	1		
2	2		
3	3		

Tabla C.2. Caída de presión en tramo de tubería PVC de $\frac{1}{2}$ " de longitud variable.

Resultados

Obtener las gráficas presión contra velocidad para el experimento 1 y presión contra longitud para el experimento 2.

Práctica 2. Pérdidas en accesorios

Objetivo

Verificar el comportamiento de las pérdidas de presión en accesorios de tuberías.

Equipo de laboratorio

Banco hidráulico de pruebas.

Contenido del reporte

1. Nombre y objetivo de la práctica.
2. Desarrollo breve (3 páginas máximo) sobre los conceptos básicos relacionados con la práctica: pérdidas de carga en accesorios, coeficientes de pérdida de carga, concepto de longitud equivalente, radio hidráulico, radio equivalente, valores típicos de coeficientes de pérdida de carga, pérdidas no recuperables en medidores de obstrucción y concepto de recuperación estática.
3. Presentación de los datos experimentales obtenidos.
4. Presentación de las gráficas de resultados obtenidos.
5. Discusión de resultados.
6. Conclusiones.
7. Bibliografía.

Antecedentes

Práctica de laboratorio: Medición de presión (manometría).

Práctica de laboratorio: Pérdidas en tuberías.

Anexo D: Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas.

Observaciones generales

- La práctica se desarrolla en el banco hidráulico de pruebas. Para su buen desarrollo se recomienda utilizar el manómetro de menor alcance, Presión 1 ± 15 psid, ya que las caídas de presión típicas para este experimento oscilan entre 0.5 a 6 psid.
- Debido a las variaciones en las lecturas de presión, se recomienda reportar un promedio visual de las lecturas con dos dígitos a la derecha del punto decimal.
- Se recomienda complementar la práctica utilizando el banco con las diez opciones de accesorios de tuberías: codo 90° , codo 45° , codo RL, expansiones, contracciones, válvula de globo, válvula de esfera, válvula de compuerta, I griega, y filtro.

Experimento: Caída de presión en codo 90°

Desarrollo

Realizar el procedimiento "Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas (Anexo D)".

Realizar las conexiones hidráulicas que se muestran en la figura C.3.



Figura C.3. Diagrama de conexiones para medir la caída de presión en el codo 90° de PVC de ½”.

En el software de operación, establecer la apertura de la electroválvula al valor inicial de 10% y encender la bomba.

Continuar el experimento para completar los valores de la tabla C.3. Esperar aproximadamente 60 s entre tomas de lecturas con el propósito de estabilizar las mediciones

Lectura	Apertura electro-válvula %	Presión 1 psid	Velocidad m/s
1	10		
2	20		
...	...		
10	100		

Tabla C.3. Caída de presión en tramo de tubería PVC de ½” de longitud constante.

Resultados

Obtener las gráficas presión contra velocidad para el experimento realizado y diversos accesorios.

Práctica 3. Pérdidas en una válvula de globo

Objetivo

Verificar el comportamiento del fluido en una válvula de globo.

Equipo de laboratorio

Banco hidráulico de pruebas.

Contenido del reporte

1. Nombre y objetivo de la práctica.
2. Presentación de los datos experimentales obtenidos.
3. Presentación de las gráficas de resultados obtenidos.
4. Discusión de resultados.
5. Conclusiones.
6. Bibliografía.

Antecedentes

Práctica de laboratorio: Medición de presión (manometría).

Práctica de laboratorio: Pérdidas en tuberías.

Práctica de laboratorio: Pérdidas en accesorios.

Anexo D: Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas.

Observaciones generales

- La práctica se desarrolla en el banco hidráulico de pruebas. Para su buen desarrollo se recomienda utilizar el manómetro de menor alcance, Presión 1 ± 15 psid, ya que las caídas de presión típicas para este experimento oscilan entre 0.5 a 9 psid.
- Debido a las variaciones en las lecturas de presión, se recomienda reportar un promedio visual de las lecturas con dos dígitos a la derecha del punto decimal.
- Se recomienda complementar la práctica utilizando el banco con las tres opciones de válvulas: globo, esfera y compuerta.
- Para estimar el porcentaje de apertura en la válvula a evaluar, se recomienda inicialmente contar el número de vueltas necesarias para llevar la válvula desde su estado completamente cerrado hasta su estado completamente abierto. Posteriormente, aplicar una regla de tres para estimar el número de vueltas necesarias para establecer el porcentaje de apertura deseado.
- Se recomienda generar previamente una hoja de cálculo que contenga la totalidad de las lecturas a registrar de acuerdo con la tabla 1.

Experimento: Comportamiento de una válvula de globo

Desarrollo

Realizar el procedimiento "Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas (Anexo D)".

Realizar las conexiones hidráulicas que se muestran en la figura C.4.

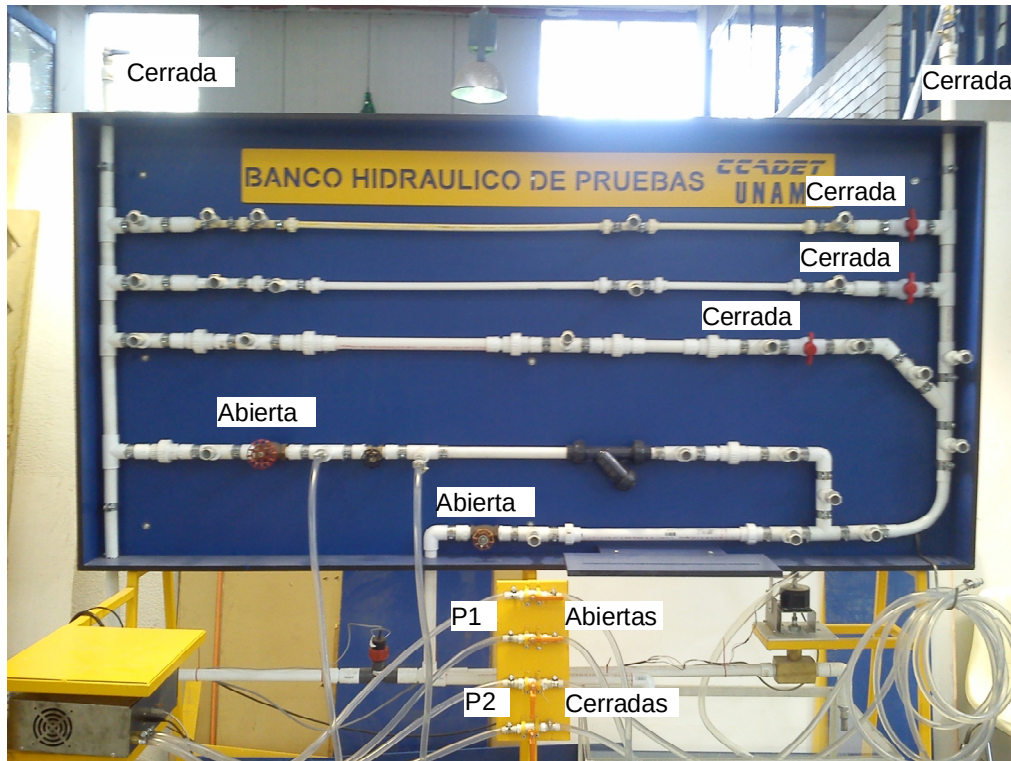


Figura C.4. Diagrama de conexiones para medir la velocidad y presión en una válvula de globo.

En el software de operación, establecer la apertura de la electroválvula al valor inicial de 0% y encender la bomba.

Continuar el experimento al variar el porcentaje de apertura de la válvula de globo de 0% hasta 100%. Posteriormente, incrementar el porcentaje de apertura en la electroválvula en un 10% superior y repetir la variación de la apertura en la válvula de globo de 0 a 100%. Llenar los datos de la tabla C.4. Esperar aproximadamente 30 s entre tomas de lecturas con el propósito de estabilizar las mediciones

Lectura	Apertura electro-válvula %	Apertura válvula de globo %	Presión 1 psid	Velocidad m/s
1	0	0		
2	0	10		
...	0	...		
11	0	100		
12	10	0		
13	10	10		
...	10	...		
22	10	100		
...	...	...		
111	100	0		
112	100	10		
...	100	...		

121	100	100		
-----	-----	-----	--	--

Tabla C.4. Velocidad y presión en una válvula de globo.

Resultados

Obtener las gráficas velocidad contra apertura de la electroválvula y presión contra apertura de la electroválvula.

Anexo D. Instalación inicial del banco hidráulico de pruebas

D.1 Descripción del banco hidráulico de pruebas

La figura D.1 muestra el banco hidráulico y sus diversos componentes

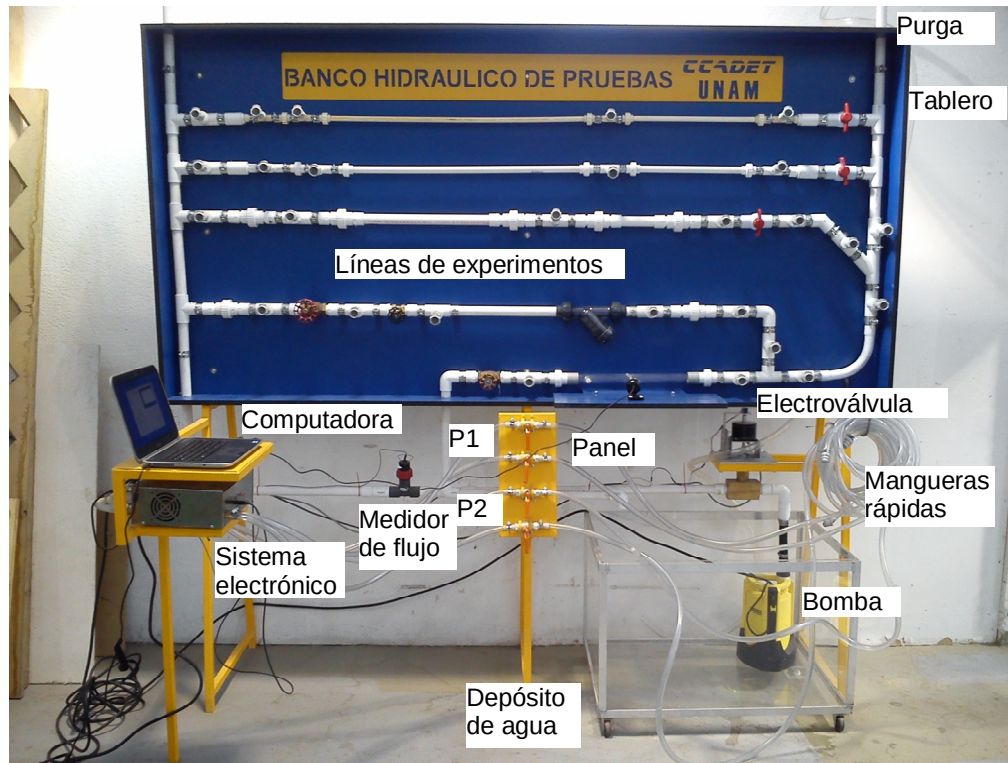


Figura D.1. Banco hidráulico de pruebas.

Purga: Es una llave a la cual se conecta una manguera flexible para eliminar las burbujas de aire en el circuito hidráulico.

Tablero: Es el tablero que sostiene el circuito hidráulico.

Computadora: Es la interface de operación del banco.

Panel: Conformado por cuatro válvulas que habilitan la circulación del fluido hacia los transductores diferenciales de presión P1 y P2 en el sistema electrónico.

Medidor de flujo. Es un flujometro de paletas con conexión al sistema electrónico que se utiliza para determinar el gasto en el circuito hidráulico.

Electroválvula: Es una válvula proporcional con conexión a la computadora la cual permite estrangular el paso principal del fluido. La válvula es operada por medio de un motor a pasos y un transductor de posición que se conectan al sistema electrónico.

Bomba. Es una bomba sumergible que proporciona el suministro principal al circuito hidráulico.

Depósito de agua: Es un tanque de acrílico transparente que contiene el agua que circula por el circuito hidráulico.

Sistema electrónico: Conformado por los circuitos electrónicos que permiten operar el banco hidráulico desde una PC.

Mangueras rápidas: Son cuatro mangueras con conectores rápidos para conectar los dos transductores de presión diferencial en el sistema electrónico a los diversos puntos de medición sobre el circuito hidráulico.

Líneas de experimentos: Son las siguientes cinco líneas en donde se evalúan pérdidas en tuberías y accesorios:

- Línea 1. Línea de experimentos. Es una línea de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " con una sección transparente en donde se pueden realizar experimentos de visualización de fluidos. Cuenta con un marco de MDF para soporte y desplazamiento de WebCam. La sección transparente cuenta con un conector plástico para inyectar colorante al fluido.
- Línea 2. Línea de accesorios de $\frac{1}{2}$ ". Es una línea en donde se pueden evaluar los siguientes accesorios: válvula de globo, válvula de compuerta, filtro, codo de 90° y T.
- Línea 3. Línea de tubería y accesorios de $\frac{1}{2}$ ". Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de PVC con tres combinaciones de diferente longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: tuerca unión, válvula de esfera, codo 45° , Y griega y codo RL.
- Línea 4. Línea de tubería de $\frac{1}{4}$ " PVC. Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de PVC con tres combinaciones diferentes de longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: reductor, expansor y tuerca unión.
- Línea 5. Línea de tubería de $\frac{1}{4}$ " CPVC. Es una línea en donde principalmente se puede analizar tubería de CPVC con tres combinaciones diferentes de longitud. Adicionalmente se pueden analizar los siguientes accesorios: reductor, expansor y tuerca unión.

D.2 Purga de aire

D.2.1 Objetivo.

Asegurar el correcto llenado con agua del circuito hidráulico del banco.

D.2.2 Desarrollo

Verificar la conexión hidráulica del diagrama de la figura D.2 y llenado del depósito de agua. En la figura D.2 se definen los estados de las válvulas de operación manual.

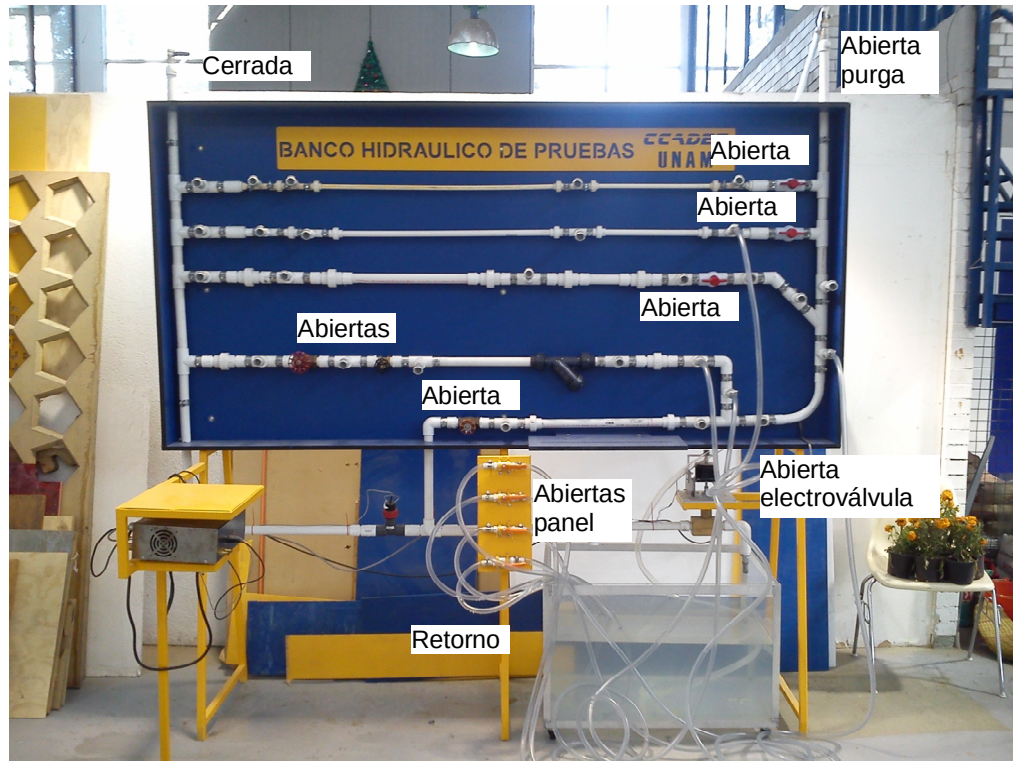


Figura D.2. Diagrama hidráulico para el llenado con agua (purga de aire).

Asegurarse que todas las válvulas mencionadas permanecen abiertas en su totalidad exceptuando la superior izquierda.

Instalar sobre la válvula superior derecha (purga) una manguera flexible con retorno al depósito de agua.

Instalar las cuatro mangueras rápidas sobre cualquier toma del circuito hidráulico.

Desinstalar los cuatro extremos opuestos de las mangueras rápidas del sistema electrónico y llevarlas de retorno al depósito de agua.

Conectar la bomba sumergible a la toma de corriente 127 VAC para iniciar la circulación de agua por el circuito hidráulico.

Verificar que no haya fugas no deseadas, solamente aquellas de retorno al depósito de agua.

Mantener esta condición de operación por aproximadamente 3 minutos.

Una vez que no haya sospecha de burbujas de aire en el interior del circuito hidráulico, conectar súbitamente los cuatro extremos opuestos de los conectores rápidos al sistema electrónico a la vez que se detiene la operación de la bomba sumergible y se cierran las válvulas de purga y del panel. Asegurarse de que no se introduzcan burbujas de aire en las mangueras flexibles que se reconectan al sistema electrónico.

D.3 Procedimiento típico para operar el banco hidráulico de pruebas

D.3.1 Objetivo

Utilizar el software de operación y sistema electrónico del banco hidráulico para realizar diversas mediciones de presión y gasto.

D.3.2 Desarrollo

Verificar la realización del punto 2 del presente documento.

Realizar las conexiones eléctricas que se muestran en la figura D.3 en donde EV=Electroválvula, BH=Bomba hidráulica, MF= Medidor de flujo y USB es la conexión a la computadora.

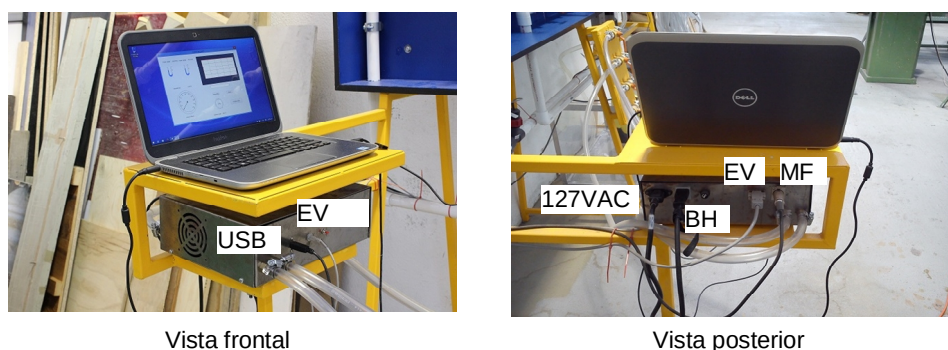


Figura D.3. Diagrama eléctrico de conexiones.

Encender la computadora.

Encender el sistema electrónico.

Iniciar el programa ControlBanco.exe.

En la consola de control se actualizan automáticamente los valores de presión, velocidad de flujo y apertura actual de la electroválvula.

Los controles disponibles para el usuario se muestran en la figura D.4 y son los siguientes: El botón para encender bomba/apagar bomba (1), la perilla giratoria para modificar la apertura actual de la electroválvula (2), el botón para iniciar la gráfica (3), el botón para borrar la gráfica (4) y el control para seleccionar el tipo de gráfica (5).

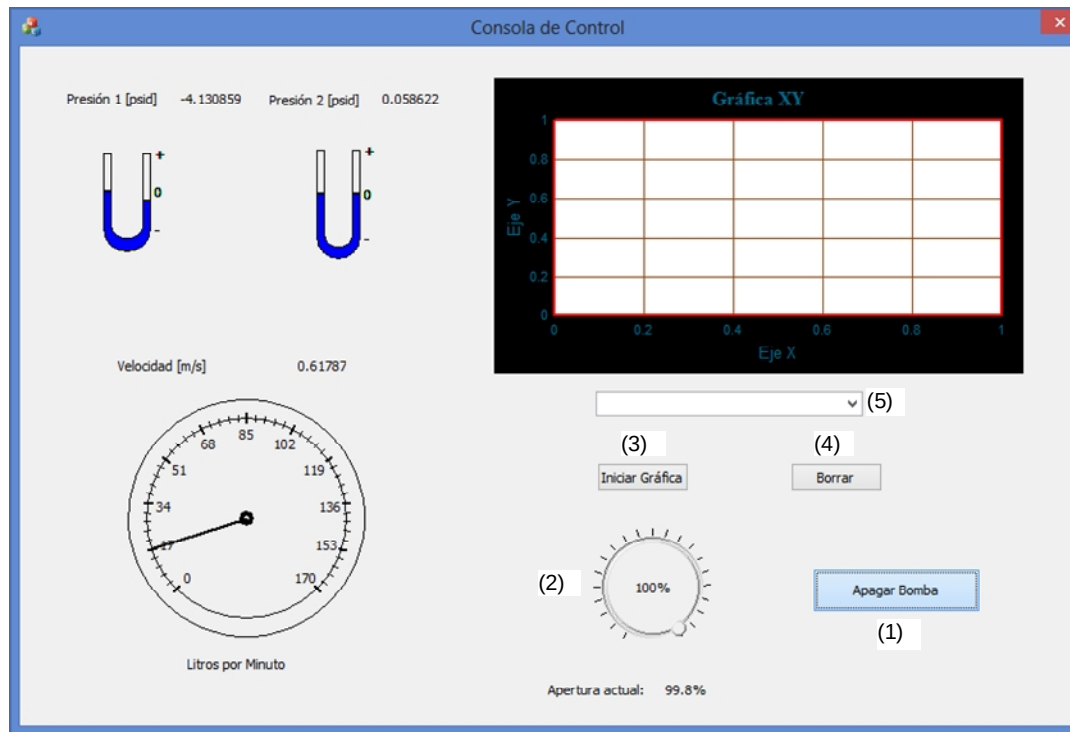


Figura D.4. Consola de control.

El funcionamiento básico del banco hidráulico se consigue al encender la bomba, abrir las válvulas del panel de transductores de presión y seleccionar la apertura actual de la electroválvula para obtener lecturas de presión y gasto.

Para la medición de presión se cuenta con dos manómetros diferenciales Presión 1 de ± 15 psid y Presión 2 de ± 30 psid. Los manómetros pueden ser conectados, según se desee, a las diferentes tomas en el circuito hidráulico mediante conectores rápidos.

Para la medición de gasto se cuenta con un despliegue analógico con unidades de litros/min y un despliegue textual con unidades de m/s.

Se debe evitar, en la medida de lo posible, encender la bomba hidráulica con la electroválvula completamente cerrada (0% de apertura).

El establecimiento del porcentaje de apertura de la electroválvula consume cierto tiempo. Por esta razón se debe esperar a que la lectura textual en el centro de la perilla se estabilice con la indicación de apertura actual.

Una vez utilizado el equipo, cerrar el programa, cerrar las válvulas del panel de transductores de presión y apagar el sistema electrónico.

Referencias

Analog Devices (sin fecha), *AD620 (Rev. H)*, [En línea], obtenida de http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD620.pdf. [Accedida el 17/09/13].

Custom Computer Services. (2007) *PCD C Compiler Reference Manual*. Custom Computer Services, USA, 319 pp.

JVR. (2013) *PIC Calculadora USB" en Mucho trasto*, [En línea], obtenida de <http://www.muchostrasto.com/PICCalculadoraUSBC++.php>. [Accedida el 12/09/13].

Kruglinski DJ, Shepherd G y Wingo S. (1988) *Programming Microsoft Visual C++*. Microsoft Press, USA, 1153 pp.

Microchip. (2007) *PIC18F2458/2553/4458/4553 Data Sheet*. Microchip, USA, 46 pp.

Microchip (2009), *MPLAB® IDE User's Guide with MPLAB Editor and MPLAB SIM Simulator*, Microchip, USA. 360 pp.

Omega Engineering Inc. (sin fecha-a), *PX26 Series Pressure Transducers*, [En línea], obtenida de <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M1608.pdf>. [Accedida el 17/09/13].

Omega Engineering Inc. (sin fecha-b), *FP-5300, FP-5100, FP8500 and FP-319X Flow Sensors*, [En línea], obtenida de <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M1931.pdf>. [Accedida el 17/09/13].

Omega Engineering Inc. (sin fecha-c), *PV SERIES Electronic Proportional Control Valves*, [En línea], obtenida de <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M1655.pdf>. [Accedida el 18/09/13].

Omron (sin fecha), *PCB Relay G5LE*, [En línea], obtenida de <http://www.farnell.com/datasheets/1509313.pdf>. [Accedida el 17/09/13].

Teofilov, N. (2003), *2D Graph ActiveX Control*, [En línea], obtenida de <http://www.codeproject.com/Articles/3214/2D-Graph-ActiveX-Control>. [Accedida el 28/08/13].