



Proyecto Fin de Carrera

Automatización de la adquisición de datos experimentales en un canal a escala

Autor

Alejandro Suárez Cebrián

Director

Dr. D. José Ignacio García Palacín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2015/2016

*La ciencia trata sobre lo que es,
la ingeniería sobre lo que puede ser.*
Neil Armstrong, 2000

Agradecimientos

Me gustaría servirme de este espacio para dar las gracias a todas la personas que me han ayudado a lo largo de mis estudios en la Universidad de Zaragoza y durante el desarrollo de este Proyecto de Final de Carrera.

En primer lugar a Ignacio García Palacín, director de este Proyecto, por darme la oportunidad de realizarlo y por su apoyo e interés, que han sido clave durante el transcurso del mismo.

Agradecer también a mis amigos y compañeros esos momentos que se guardan en el recuerdo y el apoyo ofrecido a lo largo de todos estos años.

Por último, pero no por ello menos importante, a mis padres y familiares, por apoyarme y ofrecerme su ayuda incondicional siempre que ha sido necesario.

Automatización de la adquisición de datos experimentales en un canal a escala

Resumen

La reproducibilidad de los resultados es un aspecto clave en la labor investigadora, especialmente en el ámbito de los procesos experimentales, donde tanto las medidas como las condiciones de trabajo han de ser registradas con especial cuidado. La aplicación de sistemas de control, la correcta selección de los sensores y la utilización de mecanismos de control numérico por ordenador permite el posicionamiento de los sensores, el control de actuadores y el registro de las señales de manera precisa, permitiendo repetir los experimentos en condiciones controladas de forma que se obtengan resultados reproducibles. Con motivo de investigar la aplicación de sistemas automáticos a la adquisición de datos se ha desarrollado este proyecto.

Para llevar a cabo el proyecto, primero se han estudiado los sensores más utilizados en el ámbito de la Mecánica de Fluidos, concretamente en los experimentos con canales a escala. A continuación se han analizado los sistemas de posicionamiento disponibles, comenzando por los sistemas fijos de ajuste manual y prosiguiendo con los sistemas automáticos, especialmente los de Control Numérico por Ordenador (CNC). Finalmente se ha estudiado el software y hardware de adquisición de datos.

Una vez obtenidos los fundamentos teóricos necesarios, se ha procedido a realizar la implementación del sistema de automatización que permitirá el posicionamiento de los sensores, la adquisición de datos y el posterior postprocesado de los mismos. Por último se ha realizado el montaje en el canal a escala, se ha comprobado la adecuación del sistema de medida y se ha confirmado el buen funcionamiento del mismo en un experimento de medida de transitorios.

Adicionalmente, durante el desarrollo del proyecto, se han registrado y documentado todos los pasos del mismo.

Índice general

1	Introducción y objetivos	1
1.1	Motivación	1
1.2	Adquisición de datos	2
1.3	Control de la posición	2
1.4	Objetivo	2
2	Montaje experimental	4
2.1	Requisitos del experimento	4
2.2	Descripción	4
3	Estudio de los sensores y actuadores	7
3.1	Sensor de presión	7
3.1.1	Calibración	8
3.2	Sensor de fuerza	8
3.2.1	Calibración	8
3.3	Sensor de nivel	9
3.3.1	Filtrado de los datos	9
3.3.2	Calibración	10
3.4	Activación de la compuerta	10
4	Sistemas de control de la posición	12
4.1	Elementos estáticos	12
4.2	Elementos móviles	12
4.3	Control Numérico por Ordenador (CNC)	13
4.3.1	Funcionamiento	13
4.3.2	Características	14
5	Software y hardware de adquisición de datos	15
5.1	Adquisición de datos	15
5.2	Software <i>LabView</i>	15
5.3	Tarjeta NI PCI 6032E	18
6	Implementación de la automatización	19
6.1	Calibrado	19
6.2	Sistema de control	20
7	Ánalisis de la adecuación del sistema de medida	22
7.1	Repetibilidad y reproducibilidad de los sensores	22

ÍNDICE GENERAL

7.2	Procedimiento	23
7.3	Resultados	23
7.3.1	Sensor de fuerza	23
7.3.2	Sensor de presión	25
8	Conclusiones y trabajo futuro	27
8.1	Conclusiones	27
8.2	Trabajo futuro	28
A	Diagrama temporal	29
B	Análisis GRR	30
C	Circuito electrónico de la compuerta	36
D	Esquema de conexiones	37
	Bibliografía	38

Índice de figuras

2.1	Montaje experimental y canal.	5
3.1	Sensores de presión y nivel.	8
3.2	Compuerta del canal.	11
5.1	Capturas de pantalla del software <i>LabView</i>	17
5.2	Caja de conexiones CB-68LP.	18
6.1	Diagrama de flujo del sistema de control.	20
7.1	Valores medios de las medidas de los sensores de fuerza.	24
7.2	Rangos de las medidas de los sensores de fuerza.	24
7.3	Valores medios de las medidas de los sensores de presión.	25
7.4	Rangos de las medidas de los sensores de presión.	25
C.1	Diseño del circuito electrónico de la compuerta.	36

Índice de tablas

7.1	Resultados del análisis GRR de los sensores de fuerza.	24
7.2	Resultados del análisis GRR de los sensores de presión.	26
A.1	Distribución temporal del trabajo realizado.	29
B.1	Medidas de los sensores de fuerza.	32
B.2	Ánáisis de las medidas de los sensores de fuerza.	33
B.3	Medidas de los sensores de presión.	34
B.4	Ánáisis de las medidas de los sensores de presión.	35
D.1	Conexiones de los sensores a la tarjeta de adquisición de datos.	37

Capítulo 1

Introducción y objetivos

En este documento se recoge toda la información relevante acerca del proyecto final de carrera con título *Automatización de la adquisición de datos experimentales en un canal a escala* desarrollado por Alejandro Suárez Cebrián.

1.1. Motivación

Todos los experimentos llevados a cabo en el ámbito de la ciencia y la ingeniería se realizan para obtener las medidas con la precisión deseada y buscando que estos experimentos puedan ser reproducidos para verificar los resultados. Por tanto a la hora de diseñar y preparar un experimento se tiene gran cuidado en la selección, manipulación y montaje de los sensores ya que determinarán la corrección de los resultados del mismo.

En el campo de la metrología se define el concepto de reproducibilidad como la dispersión de las medidas de una misma característica tomadas por distintos operarios con distinto equipo de medida y el concepto de repetibilidad como la dispersión de las medidas de una misma característica tomadas por un mismo operario con el mismo dispositivo de medida.[1][2]

En el caso de los procedimientos experimentales ambos conceptos son importantes, ya que unos sensores con una buena repetibilidad aseguran unas señales más precisas y por tanto unas medidas de mayor calidad, y un procedimiento experimental reglado favorece una mayor reproducibilidad del experimento por parte de otros laboratorios.

La aplicación de sistemas de control por ordenador en el ámbito de los procesos experimentales permite el posicionado de los sensores y el control de actuadores de manera precisa, así como una correcta sincronización de las medidas de los sensores con respecto a los eventos que tengan lugar en el experimento. De esta manera es posible realizar los experimentos en condiciones controladas de forma que se obtengan resultados reproducibles.

1.2. Adquisición de datos

La adquisición de datos mediante ordenador consiste en el registro de las señales analógicas o digitales procedentes de los sensores mediante un computador. Ésta se popularizó en la década de los 80 con la expansión del ordenador personal y el desarrollo de tarjetas específicas para recoger señales analógicas y transformarlas en señales digitales que eran procesadas por el computador. En la actualidad la mayoría de los procesos experimentales complejos aprovechan esta tecnología por su precisión, comodidad y versatilidad.^[3]

Uno de las metas de este proyecto es integrar el proceso de adquisición de datos en un sistema automático que efectúe el control de todo el experimento.

1.3. Control de la posición

Los sistemas de Control Numérico (NC, por sus siglas en inglés *Numerical Control*) fueron diseñados originalmente para el control preciso y automático de máquinas-herramienta (tornos, fresadoras...) mediante el uso de tarjetas perforadas. Posteriormente el uso de computadoras para controlar estos sistemas dio lugar a los actuales dispositivos de Control Numérico por Ordenador (CNC, *Computer Numerical Control*), que permiten un control de posición preciso, automático y variable en el tiempo. ^[4]

Uno de los objetivos de este proyecto es estudiar estos sistemas de cara a mejorar la precisión de los procesos experimentales en el ámbito de la mecánica de fluidos.

1.4. Objetivo

La meta principal de este proyecto es el estudio previo, diseño, implementación y montaje de un sistema capaz de controlar la activación de los mecanismos que intervienen en el experimento, posicionar uno o varios sensores, variando su posición a lo largo de experimento si fuera necesario y gestionar la adquisición de datos, su preprocesado, almacenamiento y análisis.

Los pasos que se han seguido para la realización de este proyecto han sido:

1. Estudio de los sensores y actuadores y adecuación de sus señales.
2. Investigación sobre los sistemas de control de posición (CNC).
3. Análisis del software y hardware de adquisición de datos.
4. Implementación con *LabView* del sistema automatizado de calibración, captura y procesado de datos.
5. Montaje de un sistema físico real en el canal y toma de datos.
6. Comprobación de la adecuación del sistema de medida.

Este trabajo tiene una finalidad de apoyo adicional a la labor de investigación propia de un Proyecto de Final de Carrera. La selección de los sensores, el desarrollo del sistema y el posterior análisis de los datos los he realizado con la intención de proveer de una instrumentación adecuada y precisa al estudio que están realizando los Drs. Ignacio García Palacín y Mohamed Shaban Eissa acerca de las fuerzas que actúan sobre obstáculos en un río ante la rotura de una presa aguas arriba. Concretamente el experimento se ha realizado para ayudar a modelizar la transmisión de movimiento del flujo a los obstáculos. En el [Capítulo 2](#) se detalla el montaje experimental realizado.

Capítulo 2

Montaje experimental

En este capítulo se describe el montaje que se ha realizado en laboratorio para llevar a cabo el experimento y donde se ha comprobado el funcionamiento de todo el sistema. El montaje ha tenido lugar en el canal para experimentos a escala del laboratorio del Área de Mecánica de Fluidos sito en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

2.1. Requisitos del experimento

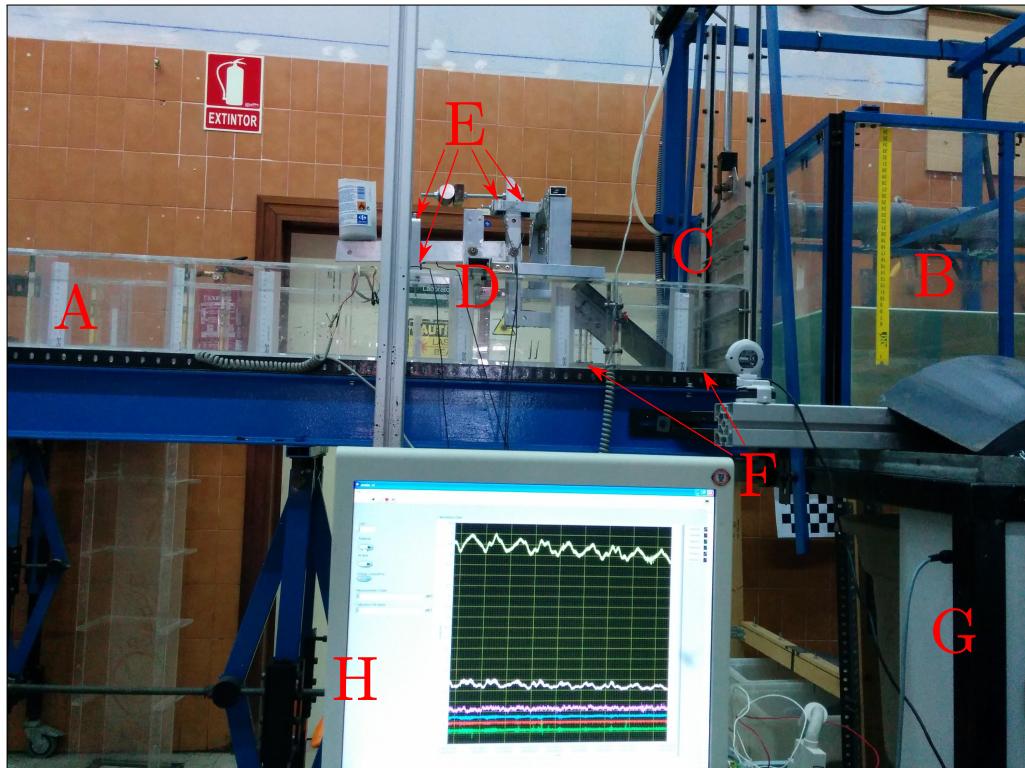
El experimento que se realizó va a ayudar a modelizar la transmisión de movimiento del flujo a los obstáculos, simulando la rotura de una presa. Se tiene especial interés en los efectos transitorios cuando la onda impacta en los obstáculos.

La instrumentación del experimento requería la medida de unas determinadas magnitudes y la activación de determinados actuadores. Los parámetros a medir son el nivel del agua en el canal y la fuerza ejercida por el agua sobre la placa que hace de obstáculo. Los actuadores que se controlan son dos electroválvulas que accionan la compuerta. En el [Capítulo 3](#) se detalla el funcionamiento de estos sensores y actuadores, si bien, determinadas funcionalidades que han sido estudiadas, no han sido incluidas en este experimento, pero se aplicarán cuando se realicen experimentos adicionales en el futuro.

2.2. Descripción

En la [Figura 2.1](#) se pueden observar los elementos que componen el montaje experimental:

Canal experimental a escala. El experimento tiene lugar en un canal de 160 mm de altura, 240 mm de anchura y 6 m de longitud por el que se puede hacer fluir agua, la primera sección se encuentra configurada en posición horizontal y la segunda con una inclinación de 3,25° para facilitar la evacuación del agua, si bien la inclinación de las distintas secciones se puede ajustar en función del experimento a realizar. El canal está construido con metacrilato transparente (Perspex) y soportado por una estructura regulable de acero.



(a) Montaje experimental en el laboratorio.



(b) Vista general del canal.

Figura 2.1: Montaje experimental y canal.

En ellas aparecen señalados los diferentes elementos involucrados:

- (A) Canal experimental a escala, (B) depósitos, (C) compuerta, (D) balancín, (E) sensores de fuerza, (F) sensores de presión, (G) caja de control del canal y (H) ordenador con tarjeta de adquisición de datos.

Depósitos. La instalación dispone de tres depósitos, uno de pie donde descarga directamente el canal y se almacena el agua, uno de cabecera que simula una presa y que contiene el agua que discurrirá por el canal durante el experimento y un tercero auxiliar debajo del de cabecera, que está en paralelo con el de pie.

Compuerta. Se dispone de una compuerta accionada neumáticamente que regula el caudal que discurre por el canal. La compuerta se puede encontrar en dos estados: abierta, permitiendo un flujo constante de agua, o cerrada, impiendo la circulación del fluido. Estos estados se controlan mediante dos electroválvulas que permiten la circulación del aire a la parte correspondiente de un cilindro neumático de doble efecto que hace ascender (o descender) la compuerta, según se quiera abrir (o cerrar) la misma.

Balancín. Para medir las fuerzas deseadas en el experimento previamente mencionado se ha diseñado una estructura de balancín que mantiene en equilibrio la placa sobre la que choca el agua. La placa ocupa toda la anchura del canal y el ángulo de incidencia puede ser regulado.

Sensores de fuerza. En el balancín se han instalado cuatro sensores de fuerza, enfrentados dos a dos, para medir las fuerzas que se ejercen sobre la placa en dirección vertical y horizontal.

Sensores de presión. Con el fin de medir el nivel del agua en distintos puntos del canal, se han situado dos sensores de presión diferencial, uno aguas arriba del balancín y otro aguas abajo. No se han utilizado los sensores de nivel que se detallan más adelante porque interferían con el movimiento de la placa.

Caja de control del canal. La electrónica de control del canal se encuentra aquí, así como los botones de accionamiento manual. Permite abrir y cerrar la compuerta y accionar la bomba de retorno que efectúa el llenado del depósito de cabecera. Como parte del proyecto se ha incluido en la caja el circuito para hacer un control automático de la compuerta desde un ordenador.

Ordenador con tarjeta de adquisición de datos. El ordenador dispone de una tarjeta de adquisición de datos que recogerá la señal de los distintos sensores y enviará las señales de control a la compuerta. El programa desarrollado como parte del proyecto se encarga de sincronizar todo el experimento procesando, almacenando o enviando las señales que corresponda en cada momento.

Ordenador para la captura de imagen. Como parte del experimento, pero fuera del ámbito de este proyecto, se ha realizado la grabación en vídeo del mismo para poder realizar un análisis posterior de las imágenes.

Capítulo 3

Estudio de los sensores y actuadores

En este capítulo se mostrarán los distintos sensores utilizados en los experimentos de mecánica de fluidos y se detallarán las características de los empleados en el estudio de rotura de presa. Así mismo se tratarán los actuadores utilizados para controlar el experimento.

3.1. Sensor de presión

Una de las magnitudes más importantes en los experimentos de mecánica de fluidos es la presión, ya sea por sí misma o para derivar otras medidas como nivel o velocidad.

En esta ocasión se decidió utilizar un sensor de presión (SDXL010 de *Sensor Technics*) que se encontraba disponible en el laboratorio y con el que se han tenido experiencias previas positivas para calcular el nivel del fluido a su paso por el canal. Se trata de un sensor de presión diferencial de reducido tamaño y diseñado para medir pequeñas presiones, en nuestro caso su rango de hasta 10 inH₂O (2,5 kPa) es adecuado para medir el nivel en el canal ya que éste mide menos de 250 mm. Se trata de un sensor cuya salida se encuentra compensada en un rango de entre 0 °C y 50 °C favoreciendo la repetibilidad de los experimentos.^[5]

Estos sensores proveen una salida ratiométrica a la tensión de alimentación con un rango de 2,08 mV/V, esto es, la salida de tensión es directamente proporcional a la diferencia de presión entre sus dos terminales y a la tensión de alimentación. Por tanto será preciso hacer una calibración de los mismos antes de comenzar a utilizarlos. La tarjeta de adquisición de datos es capaz de trabajar en estos rangos de tensión, así que no es necesario el uso de un circuito electrónico adicional para amplificar la señal de medida.^[6]

3.1.1. Calibración

Una vez instalados en el canal, para llevar a cabo la calibración de esos sensores se procedió a llenar el canal de agua con una serie de alturas conocidas con el fin de extraer la recta de calibración de los mismos.¹

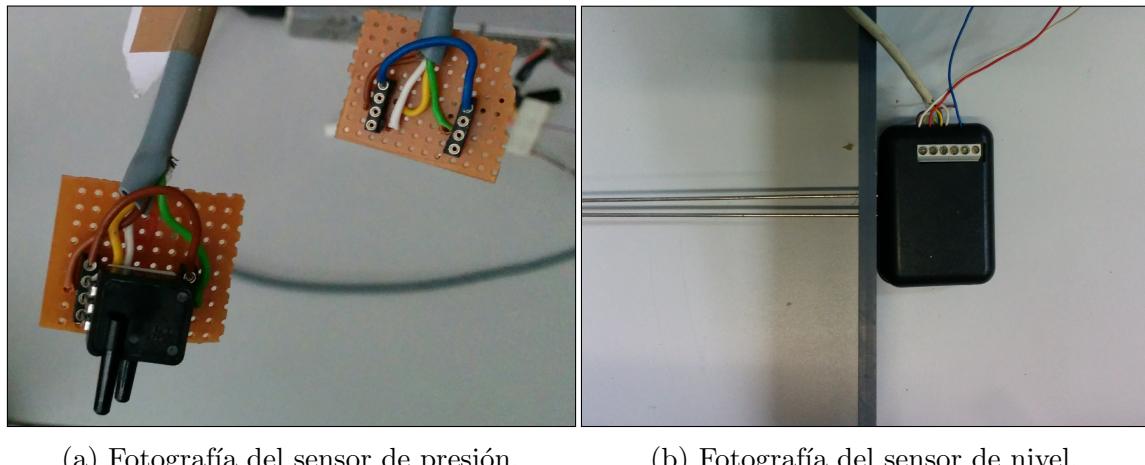


Figura 3.1: Sensores de presión y nivel.

3.2. Sensor de fuerza

En un experimento de mecánica de fluidos en ciertas ocasiones puede ser necesario medir la fuerza que ejerce un fluido sobre un modelo o comprobar la pérdida de carga de un perfil.

En nuestro caso se desea medir la fuerza ejercida por una onda en una simulación a escala de la rotura de una presa. Para ello se ha diseñado un balancín que actúa sobre cuatro sensores de fuerza. He elegido el sensor FC22 de *Measurement Specialties* por sus características: está compensado térmicamente, evitando errores de medida debidos a cambios de temperatura; su rango de trabajo de aproximadamente 222 N (50 lbf) se ajusta a las fuerzas que se desean medir y su diseño resistente al fallo por fatiga asegura un ciclo de vida largo manteniendo la precisión.^[7]

Este sensor se encuentra disponible con salida de baja tensión (del orden de mV) o amplificada (entre 0,5 V y 4 V). Se ha decidido utilizar el modelo con amplificación para evitar posibles errores de medición inducidos por fuentes externas en los cables.

3.2.1. Calibración

Por las características del montaje experimental, antes de ser montados en el balancín, los sensores han sido calibrados con una serie de masas conocidas para

¹En la Sección 6.1 se detalla el programa realizado para ayudar en la calibración de todos los sensores.

obtener la recta de calibración de los mismos. Una vez instalados en su posición final y antes de empezar el experimento, se ha corregido el valor de cero de cada uno de ellos debido a cargas generadas por imperfecciones en la construcción del propio balancín.

3.3. Sensor de nivel

Para las medidas de nivel está previsto utilizar un sensor que se diseñó específicamente en el Área de Mecánica de Fluidos para un experimento anterior. Se caracteriza por tener un tiempo de respuesta rápido para poder trabajar con una tasa de muestreo alta manteniendo una precisión suficientemente fina y un rango de medida adecuado, poco frecuente en los equipos comerciales.

La medida de nivel se basa en la variación de resistencia existente entre dos varillas cilíndricas al variar la porción de las mismas que se encuentra sumergida en el agua.

Si se usa una corriente continua, los iones de los minerales disueltos en el agua se acumulan en el ánodo y el cátodo evitando que la tensión varíe al cambiar el nivel del agua. Para evitar este problema, se decidió utilizar una corriente alterna de señal cuadrada y una frecuencia de 30 kHz que evita los problemas de ionización.^[8]

El sensor consta de dos varillas de acero inoxidable de 1,2 mm de diámetro y 160 mm de longitud separadas entre si 10 mm. Las reducidas dimensiones de las varillas no perturban el flujo de agua de una manera significativa.

3.3.1. Filtrado de los datos

Utilizar una corriente alterna tiene un inconveniente. Durante el tiempo de subida y de bajada de la onda se obtienen medidas erróneas que han de ser filtradas. Se pueden usar dos aproximaciones: hacer un filtrado estadístico mediante el criterio de *Chauvenet* eliminando los valores que se alejan de las medidas esperadas^[9] o eliminar las señales que se tomaron durante los tiempos de subida y bajada de la señal de activación del sensor.

Se descartó el uso de la segunda aproximación ya que requería la adquisición de datos a una frecuencia significativamente superior a la frecuencia de excitación del sensor. El teorema del muestreo de *Nyquist-Shannon* indica que la frecuencia de muestreo ha de ser de al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal a medir^[10]. En nuestro caso la frecuencia máxima esperada es la provocada por la señal de excitación del sensor (30 kHz) y por tanto necesitaríamos una tasa de muestreo de al menos 60 000 muestras/s. La tarjeta de adquisición de datos de la que disponemos² no es capaz de alcanzar esa tasa de muestreo.

²Sus características se detallan en la Sección 5.3

El diseño actual del sensor provoca que las señales medidas tengan un desplazamiento respecto del cero (*offset*) variable en función de la señal alterna de excitación. Dicho error ha de ser corregido también durante esta etapa.

3.3.2. Calibración

Para llevar a cabo la calibración de esos sensores se procedió a llenar el canal de agua con una serie de alturas conocidas con el fin de extraer la recta de calibración de los mismos.

3.4. Activación de la compuerta

Como se explica en la [Sección 2.2](#), el canal dispone de una compuerta accionada neumáticamente que regula el flujo de agua que discurre por el mismo.

Originalmente la compuerta se activaba manualmente mediante dos pulsadores, con el consiguiente problema de falta de precisión en la sincronización de los sensores y el comienzo del experimento, llevando a posibles problemas de repetibilidad del mismo. Para solucionar este problema se planteó realizar la adquisición de la señal de activación manual para obtener una señal que marcará el comienzo del experimento. Finalmente se optó por controlar el estado de la compuerta desde el ordenador, siendo éste el encargado de toda la gestión del experimento.

Para realizar el control de las electroválvulas se decidió diseñar un circuito electrónico específico que recibiera las señales de control de baja tensión generadas por la tarjeta de adquisición de datos y activara la electroválvula correspondiente.³ He utilizado un circuito integrado (ULN2003A) que contiene una serie de transistores *Darlington* que permiten controlar la tensión de trabajo de 24 V de las electroválvulas en función de la señal de control enviada por el ordenador. Adicionalmente, este chip integra una serie de diodos de protección contra las posibles corrientes inducidas producidas por las electroválvulas. De esta manera se protege la tarjeta de adquisición de datos de sobretensiones que pudieran dañarla o falsear las medidas de los sensores.[\[11\]](#)

Se ha montado el sistema de control automático en la caja de control del canal y se ha mantenido el sistema original de activación manual en paralelo al nuevo, como medida de seguridad o para aquellos experimentos que no hagan uso del mismo.

³En el [Apéndice C](#) se encuentra el diseño electrónico del circuito.



Figura 3.2: Compuerta del canal.

Capítulo 4

Sistemas de control de la posición

En este capítulo se ilustrarán los distintos sistemas de posicionamiento que se pueden utilizar en los procesos experimentales del ámbito de la mecánica de fluidos, tanto aquellos que sitúan elementos estáticos, como los que posicionan elementos móviles, dentro de estos últimos se describen los sistemas de Control Numérico por Ordenador.

4.1. Elementos estáticos

En gran parte de los experimentos realizados en un laboratorio el posicionamiento de los sensores o los distintos elementos se realiza de una manera manual. En muchas ocasiones es necesario el diseño de estructuras específicas para el experimento. Éstas pueden estar diseñadas y elaboradas de forma concreta o utilizar estructuras prefabricadas de perfil de aluminio (o un material similar) para conseguir el diseño deseado.

El diseño ex profeso de la estructura asegura su perfecto ajuste a las necesidades del investigador, pero tiene la desventaja de ser más costoso en tiempo o dinero. Por contra, las estructuras realizadas con piezas prefabricadas ofrecen una versatilidad y rapidez en el montaje inmejorables, pero tienen limitaciones a las que hay que adaptarse.

Tanto en un caso como en el otro los sensores o elementos pueden encontrarse o bien fijos en la estructura, en cuyo caso el posicionamiento ha de realizarse cuidadosamente durante el ensamblaje del sistema, o bien posicionados en vástagos regulables o guías lineales que permiten ajustar la posición con la ayuda de reglas u otros elementos de medida. Este posicionamiento manual puede causar inexactitudes en la disposición del sistema que causen posteriores errores en las medidas.

4.2. Elementos móviles

Ciertos elementos que forman parte del experimento, como sensores o modelos, es necesario que sean móviles, que su posición se pueda variar entre un experimento

y otro o durante el mismo. En el primer caso se pueden utilizar los sistemas mencionados en la sección anterior, como vástagos o guías lineales, siempre teniendo especial cuidado en el proceso de posicionamiento. En el segundo caso se requiere de un dispositivo capaz de posicionar de manera precisa el elemento a lo largo del experimento mientras guarda registro de dichas posiciones, como un sistema diseñado específicamente a tal fin o un sistema de Control Numérico por Ordenador (CNC).

4.3. Control Numérico por Ordenador (CNC)

Los sistemas de Control Numérico por Ordenador (CNC, por sus siglas en inglés *Computer Numerical Control*) surgieron como una evolución de los sistemas de Control Numérico que trabajaban con tarjetas perforadas para realizar un control automático de máquinas-herramienta. Por sus características permiten un control de posición preciso, automático y variable en el tiempo que se puede aprovechar en el ámbito de los procesos experimentales.^[4]

4.3.1. Funcionamiento

Los sistemas de Control Numérico por Ordenador están formados por varios elementos, una unidad de control conectada al ordenador y una serie de dispositivos como motores o actuadores lineales que realizan el posicionamiento.

Los sistemas CNC funcionan en un sistema de coordenadas que permite colocar un elemento (originalmente una herramienta de corte) en una posición concreta de una manera precisa. El ordenador y la unidad de control se comunican en un lenguaje llamado *G-Code* que permite comunicar o bien órdenes de movimiento que indican la posición de destino, velocidad, tipo de movimiento (lineal, circular...) o bien órdenes generales de configuración del sistema.^[12]

En primer lugar el ordenador envía una orden a la unidad de control que la recibe e interpreta. En función de la orden recibida, realiza los cálculos necesarios y envía las señales adecuadas para accionar los dispositivos de posicionamiento. Si ha sido configurado de tal manera, la unidad de control envía al ordenador la posición de los distintos actuadores a intervalos regulares.

Antes de comenzar a funcionar el sistema ha de pasar por una fase de inicialización. Durante esta etapa, se configuran distintos parámetros, como la velocidad de desplazamiento de los diferentes actuadores, la posición de origen de los mismos, las unidades a utilizar u *offsets* provocados por la geometría de las herramientas acopladas. El último paso del proceso de inicialización es desplazar los actuadores a su posición de origen, esta acción es conocida como *homing* (del inglés *home*, hogar).

Antes de desconectar el sistema tienen lugar una serie tareas, se desplazan los actuadores a sus posiciones de origen y se desconecta la alimentación.

4.3.2. Características

El sistema CNC disponible en el Área de Mecánica de Fluidos es de la marca *ISEL Automation*, con conexión serie (RS-232) al ordenador y capacidad para manejar hasta tres actuadores. Puede trabajar en dos maneras: en el modo autónomo (CNC), se envía al control previamente todo el *G-code* que ha de ejecutar y cuando se desee, se puede empezar el proceso, incluso si está desconectado del ordenador; en el modo directo (DNC) el código es enviado en tiempo real desde el computador para que las operaciones sean realizadas. En nuestro caso usaremos el segundo al ofrecer más versatilidad.[13]

También hay disponibles tres actuadores lineales *LES 5* de la misma empresa de distintas longitudes (0,89 m y 1,29 m), cada uno de ellos dispone de un motor paso a paso capaz de girar de forma precisa en saltos de 1,8°, dicho movimiento rotatorio es convertido en desplazamiento lineal mediante un husillo de bolas. Dicho husillo tiene un paso de rosca de 5 mm/rev que nos proporciona una resolución de 0,02 mm y una velocidad máxima de desplazamiento de 100 mm/s.[14]

Estas características son adecuadas para realizar el posicionamiento de sensores o elementos del experimento con una precisión suficiente. Para la fase actual del experimento he prescindido del uso del sistema CNC, pero se ha realizado la investigación e implementación necesaria para su uso futuro.

Capítulo 5

Software y hardware de adquisición de datos

En este capítulo se presentará el software de adquisición de datos y control, *LabView* de *National Instruments*, que se ha decidido utilizar y el dispositivo para adquisición de datos analógicos, la tarjeta PCI 6032E de la misma empresa.

5.1. Adquisición de datos

El componente clave de un sistema de adquisición de datos es el Conversor Analógico Digital (ADC, por sus siglas en inglés *Analogic-Digital Converter*) que se encarga de leer la señal analógica y transformar el valor de la señal en ese momento a un valor digital representado mediante una serie de bits.

El procesado de señales analógicas se realiza en sucesivos pasos. En primer lugar las señales de los distintos sensores llegan a los distintos puertos de la tarjeta. Si la tarjeta dispone de ADC suficientes, cada señal es procesada independientemente; si, por el contrario, la tarjeta incluye un único ADC, éste recibe las señales de los sensores multiplexadas, esto es, va leyendo de manera alternativa cada una de las señales entrantes de manera que cada una se procese a la frecuencia de muestreo que deseemos. En ambos casos, antes de pasar por el ADC, la señal puede ser amplificada con la ganancia adaptada al rango de tensiones que proporciona el sensor para obtener una señal digital con la mejor resolución posible. La serie de señales digitales son enviadas al ordenador para su procesado y almacenamiento.^[15]

5.2. Software *LabView*

En experimentos anteriores realizados en el Área de Mecánica de Fluidos se optó por implementar el software de adquisición de datos utilizando un lenguaje de programación de propósito general como *Visual Basic* o *C*. Estos lenguajes ofrecen una mayor eficiencia pero dificultan el uso de interfaces gráficas y hacen más complicada la modificación del programa. Además las bibliotecas para estos lenguajes (propor-

cionadas por *National Instruments*) para interaccionar con el hardware de adquisición de datos no permiten aprovechar todas las características de dicho hardware.^[8]

LabView es una herramienta de la empresa *National Instruments* que permite interactuar con el usuario mediante botones, indicadores y gráficas de forma sencilla al mismo tiempo que permite programar de manera gráfica tareas complejas. Además dispone de una potente interfaz para trabajar con los dispositivos de adquisición de datos que comercializa la propia empresa. También puede trabajar con bibliotecas de uso general escritas en otros lenguajes de programación.

Se ha decidido utilizar este software por sus facilidad de uso, ya que sus características permiten modificar el programa para adaptarlo a nuevos experimentos con facilidad y trabajar con la tarjeta de adquisición de datos de manera sencilla y aprovechando todas sus características. El sistema CNC presentado en la [Subsección 4.3.2](#) dispone de una biblioteca para *LabView* que permite integrar perfectamente el sistema de control de posición en las rutinas de nuestro programa.

Los programas desarrollados en *LabView* se llaman *VI* (iniciales de *Virtual Instruments*) y constan de dos vistas (como se puede ver en la [Figura 5.1](#)):

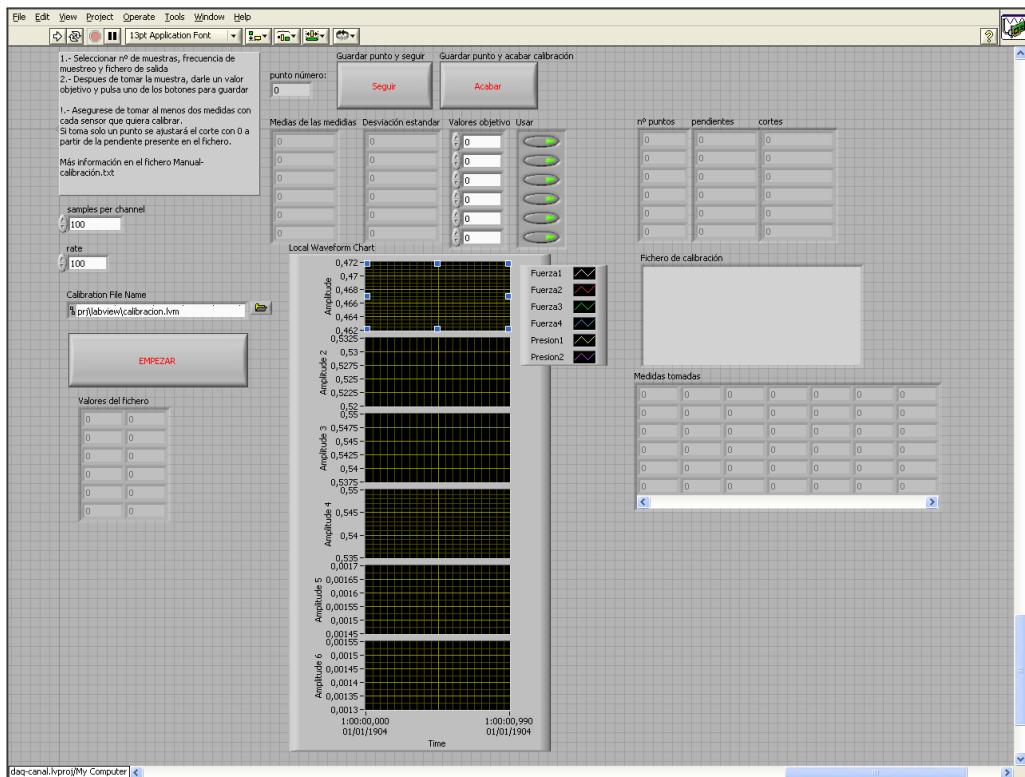
Vista gráfica Una vista con aspecto de un panel de control que incluye indicadores que muestran las salidas del programa (indicadores numéricos, gráficas...) y controles (botones, campos de texto, deslizadores, etc.) que permiten controlarlo. Para un uso normal, los usuarios sólo necesitan acceso a esta interfaz.

Vista de bloques Una vista de bloques que representa toda la lógica del *VI* mediante elementos que realizan operaciones, cables que transmiten la información de unos bloques a otros y estructuras de control como bucles o selectores de distintos casos. Dichos bloques pueden ser funciones básicas proporcionadas por el programa o *subVI*, esto es, programas diseñados por nosotros para realizar funciones repetitivas y más complejas.

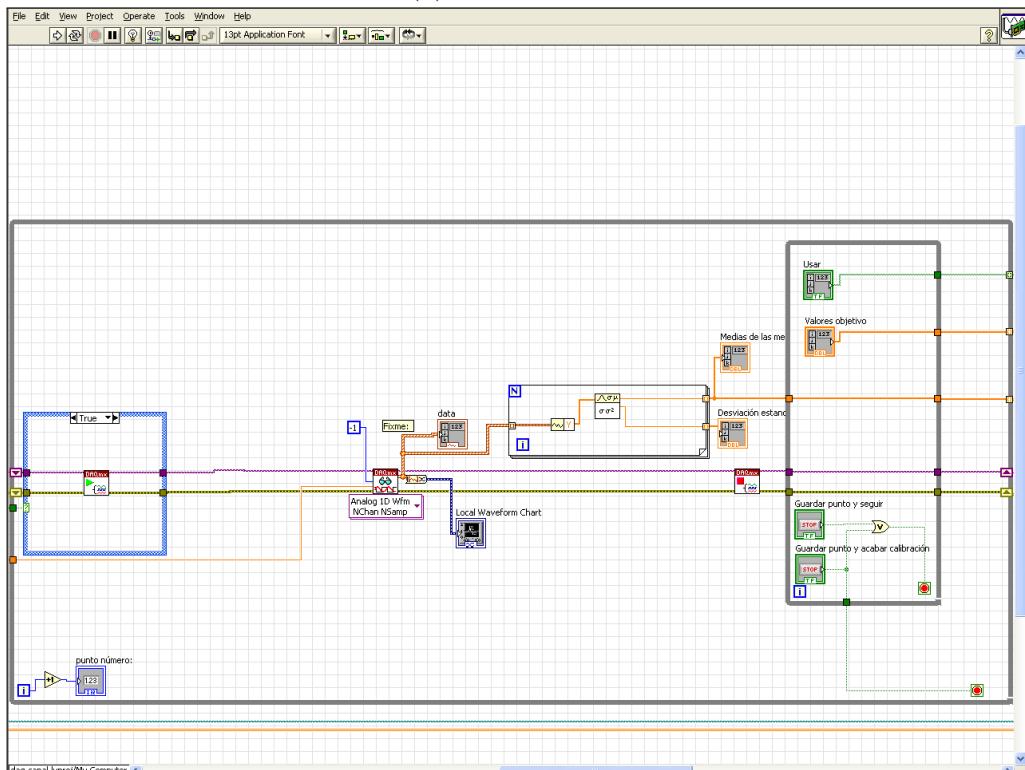
De cara a la implementación,¹ en lugar de un solo programa monolítico, he decidido crear distintas subVI con las tareas más comunes (adquirir datos, accionar actuador...) para poder reutilizarlos de manera más ordenada y de esta forma gestionar más fácilmente los componentes del programa evitando errores.

Se han ido desarrollando progresivas iteraciones del programa según se iban completando los estudios sobre los sensores, los actuadores, el sistema CNC y la tarjeta de adquisición de datos, elevando la complejidad del mismo al incluir las nuevas funcionalidades.

¹La implementación se detalla en profundidad en el [Capítulo 6](#).



(a) Vista gráfica.



(b) Vista de bloques.

Figura 5.1: Capturas de pantalla del software *LabView*.

5.3. Tarjeta NI PCI 6032E

Se trata de una tarjeta de adquisición de datos multipropósito de elevada precisión y velocidad que ya había sido utilizada en laboratorio previamente con excelentes resultados. Está fabricada por *National Instruments*, la misma empresa que desarrolla *LabView*, lo que nos asegura una perfecta compatibilidad entre ambos.

Dispone de 16 entradas analógicas de rango variable con una resolución de 16 bits y una capacidad de muestreo neta de hasta 100 000 muestras/s. Al disponer de un solo Conversor Analógico Digital las señales de muestreo serán multiplexadas. Los 6 canales nos ofrece una tasa de muestreo real de 16 666 muestras/s en cada canal, lo que nos permiten tomar medidas de gran precisión de las señales producidas por los sensores. Adicionalmente las entradas y salidas digitales nos permiten hacer un control automático de los actuadores.[6]

En conjunto con la tarjeta se ha utilizado la placa de conexiones (CB-68LP) que permite hacer una conexión fácil y ordenada entre los sensores y la tarjeta, evitando problemas y malas conexiones que podrían derivar en medidas falseadas e incorrectas.[16]

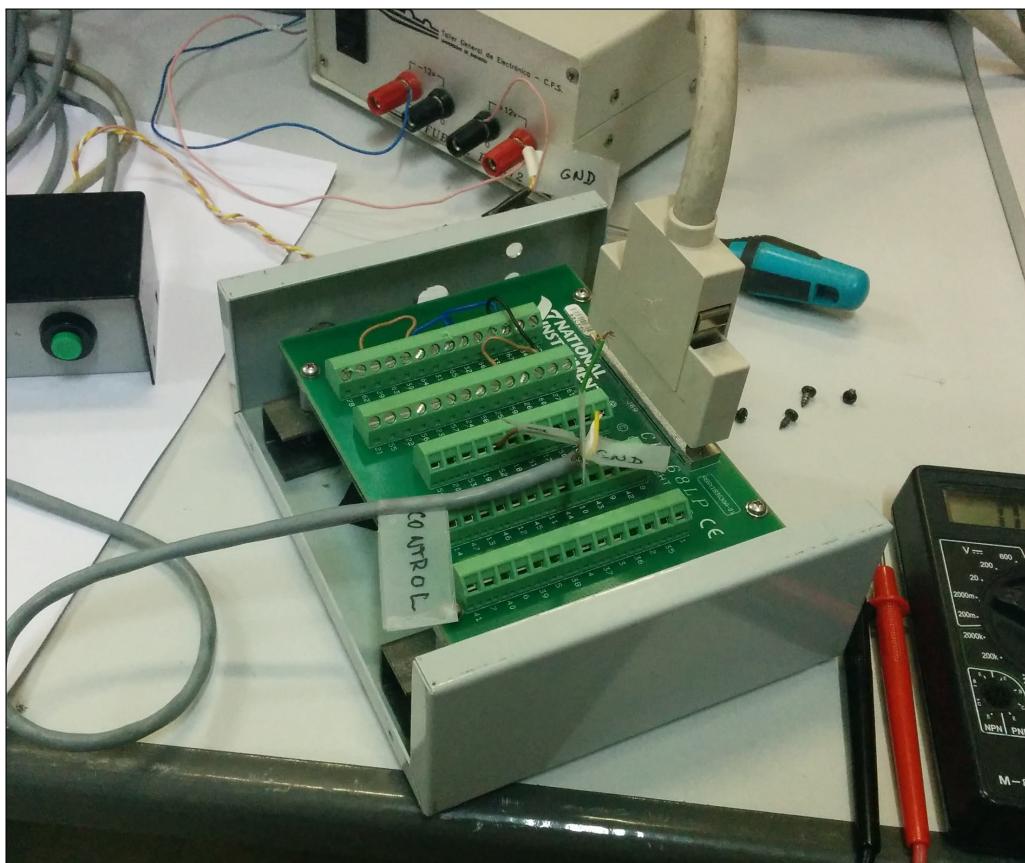


Figura 5.2: Caja de conexiones CB-68LP de *National Instruments*.

Capítulo 6

Implementación de la automatización

En este capítulo se presentará el programa de ayuda al calibrado y el sistema que controla el experimento. Sobre las partes que componen el segundo, en primer lugar se detalla la inicialización del sistema, a continuación el control de la posición y por último los procesos necesarios para llevar a cabo la correcta adquisición de datos: el procesado de la señal analógica recogida de los sensores y su posterior almacenamiento.

6.1. Calibrado

El proceso de calibración de los distintos sensores es un elemento clave para asegurar la precisión de las medidas efectuadas al ayudar a reducir el error sistemático. El error sistemático es aquel que tiene valor constante para una medida dada y solo varía al cambiar el valor a medir. Puede estar provocado por un ajuste de cero erróneo, errores de paralaje o la no linealidad del sensor.^[15]

Para facilitar el proceso de calibrado y ajuste de los sensores he desarrollado un programa en la plataforma *LabView* que permite realizar una calibración inicial o ajustar y corregir las ya existentes. Este programa genera un fichero que se utilizará posteriormente en el procesado de las señales adquiridas durante el experimento.

El programa permite especificar qué sensores deseamos utilizar y realiza el calibrado en dos fases. En un primer momento ha de someterse el o los sensores a una carga conocida que indicaremos en el programa y se toman una serie de muestras. Este proceso se puede repetir el número de veces que se desee para obtener más puntos. Una vez concluida la toma de muestras, si hay dos o más puntos, se procede a hacer un ajuste por mínimos cuadrados de la recta de calibración de cada sensor. Si solo se ha tomado un punto, se realiza un ajuste del corte con cero de la recta de calibración para ese valor, permitiendo realizar ajustes finos independientes de las características del sensor. Las características de estas nuevas rectas se almacenan en un fichero de texto. Si no se ha realizado calibración alguna se mantendrán los

valores de *offset* y pendiente de la calibración anterior. Dicho fichero se utilizará en el proceso de adquisición de datos.

6.2. Sistema de control

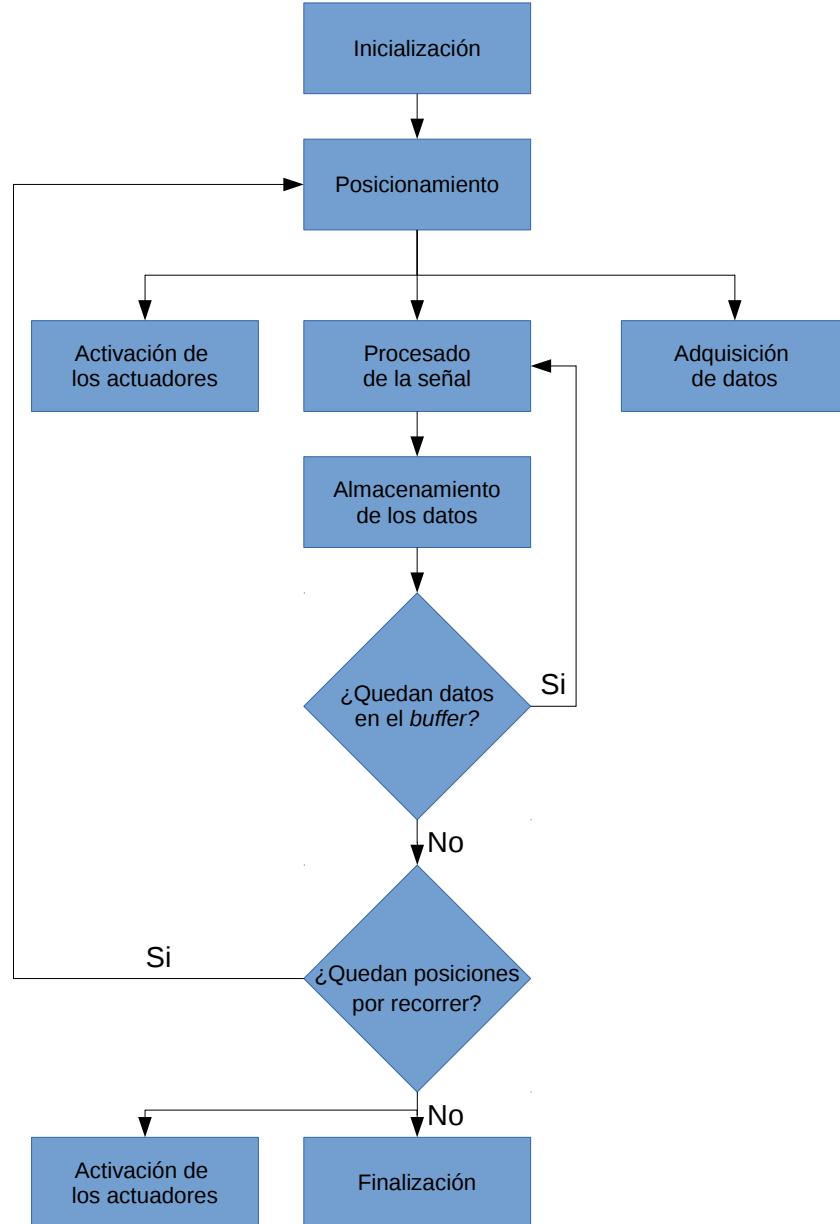


Figura 6.1: Diagrama de flujo del sistema de control.

El programa que he diseñado se encarga de hacer todo el control del experimento y trabaja en varios pasos que se muestran en la [Figura 6.1](#) y se detallan a continuación:

Inicialización. Primero tienen lugar los procesos necesarios para la puesta en marcha del sistema. Se lee el fichero con los parámetros de calibración de los sensores y se procesa el fichero que contiene las posiciones a las que se desplazará el sistema CNC. También se crea un directorio con la fecha y la hora actuales donde se almacenarán las medidas, de esta manera se evita la pérdida de datos por sobreescritura y las medidas de distintos experimentos están organizadas. Se prepara el hardware de adquisición de datos y se realiza el procedimiento de arranque del sistema de posicionamiento CNC.

Posicionamiento. Una vez todos los subsistemas están dispuestos, el sistema de control de posición CNC desplaza los sensores o elementos móviles a las localizaciones indicadas por el fichero de posiciones.

Adquisición de datos. Cuando todos los elementos se encuentran en su posición deseada, se activan los actuadores que se indiquen mientras que, sincronizadamente, comienza la captura de datos. Las señales son registradas por la tarjeta de adquisición de datos con la frecuencia de muestreo que deseemos y almacenadas temporalmente en una memoria temporal (*buffer*).

Procesado de la señal. El programa lee las señales almacenadas en el *buffer* a intervalos regulares y las procesa aplicándoles los parámetros correspondientes del fichero de calibración.

Almacenamiento de los datos. Los datos procesados son mostrados en la pantalla del ordenador para que el investigador pueda verificar que no hay anomalías graves en el proceso. Al mismo tiempo, los datos procesados se guardan en el disco duro en un fichero en el directorio que se ha creado durante la inicialización, adicionalmente también se guarda la posición en la que se tomaron las medidas. Como medida de seguridad se almacenan también los datos en crudo.

Una vez finalizada la adquisición de datos, si se han definido más puntos de medida en el fichero de posiciones, se repite el proceso realizando un nuevo posicionamiento y la consiguiente adquisición de datos. Si por el contrario no se han de realizar más medidas comienza la etapa de finalización.

Finalización. En este último paso se activan los actuadores que darán fin al experimento y se almacena en un fichero la información referente al experimento, tal como los ficheros de calibración utilizados o los parámetros configurados por el usuario. También se desactiva el sistema de posicionamiento CNC y el hardware de adquisición de datos. Una vez concluidas todas las tareas, finaliza el programa.

Capítulo 7

Análisis de la adecuación del sistema de medida

En el presente capítulo se introduce el método de análisis de la Repetibilidad y Reproducibilidad de los Sensores (conocido como R&R o GRR por sus iniciales en inglés *Gage Repeatability and Reproducibility*) recomendado por la AIAG (*Automotive Industry Action Group*). A continuación se muestra el procedimiento que tuvo lugar para realizar dicho análisis para los distintos sensores utilizados en el experimento. Por último se muestran los resultados obtenidos.

7.1. Repetibilidad y reproducibilidad de los sensores

Con el objetivo de asegurar la calidad de las medidas decidí realizar un análisis estadístico del sistema de medición. Concretamente se midió la repetibilidad y la reproducibilidad de los sensores antes del experimento. Se eligió el método GRR desarrollado por la AIAG (*Automotive Industry Action Group*) basado en la media y el rango de las medidas por su extendido uso en la industria, su sencilla implementación y su capacidad para identificar problemas de repetibilidad y reproducibilidad por separado.^[2]

Tras la toma de una serie de medidas de magnitudes conocidas por parte de distintos operarios, se realiza un análisis de las medias de las medidas y la diferencia entre valores máximos y mínimos de las mismas (rango). Dichas muestras se toman en un orden aleatorio para minimizar los errores y prejuicios de los operarios. Las variaciones de estos parámetros entre las medidas de distintos operarios nos ofrece la desviación típica relativa a la reproducibilidad, mientras que las variaciones entre las medidas de distintos fenómenos nos proporciona el error de repetibilidad. Dichas variaciones se comparan con la desviación típica del sistema en uso para saber si los resultados de repetibilidad y reproducibilidad son adecuados para nuestro proceso.

En nuestro caso, al tratarse de una toma de datos automatizada y realizada por el ordenador no tiene sentido referirnos a la reproducibilidad entre distintos operarios

sino que se va a analizar la reproducibilidad entre los distintos sensores del mismo tipo.

7.2. Procedimiento

Sensor de fuerza: Para llevar a cabo a el análisis GRR de los sensores de fuerza, una vez calibrados, se sometieron a una carga conocida depositando una serie de pesas de masas determinadas sobre ellos. Esta toma de medidas tuvo lugar antes de ser instalados en el montaje experimental ya que el montaje en el balancín dificultaba la aplicación de una fuerza determinada.¹

Sensor de presión: Por el contrario, las mediciones realizadas con los sensores de presión para el análisis del sistema de medida se tomaron con éstos instalados en el canal, llenando el mismo con alturas conocidas de agua.

7.3. Resultados

Los resultados de método GRR se pueden analizar tanto gráfica como numéricamente. El análisis gráfico permite extraer conclusiones cualitativas e identificar errores representativos en las medidas. Gracias al estudio numérico podemos obtener resultados cuantitativos desglosados del error relativo a la repetibilidad y reproducibilidad. Éste nos ofrece las desviaciones típicas correspondientes a la variación en el equipo (repetibilidad, indicada con las iniciales EV) y la variación entre operarios o sensores (reproducibilidad, señalada como AV) así como su relación con respecto del error general en las medidas (denotado TV , que incluye AV , EV y PV que es la variación entre las distintas cargas conocidas).

7.3.1. Sensor de fuerza

En la [Figura 7.1](#) se muestra la media de las medidas de los distintos estados. Podemos observar que las medias son prácticamente coincidentes, indicando una buena reproducibilidad de las medidas entre los distintos sensores. La [Figura 7.2](#) representa el rango de las medidas de los diferentes estados. Podemos apreciar en dicha gráfica que los rangos se encuentran por debajo del límite impuesto por la precisión de la tarjeta de adquisición de datos, lo que nos asegura que el error correspondiente a la posible falta de repetibilidad de los sensores se encuentra por debajo de nuestra capacidad de medida, confirmando la correcta selección de los mismos.

En la [Tabla 7.1](#) podemos observar los resultados del análisis.² Las desviaciones típicas EV y AV son mucho menores que la variación total TV , como se ve reflejado en los valores porcentuales. El valor de $\%GRR < 10\%$ nos indica que el sistema de medida es adecuado para nuestro rango de medida.

¹El procedimiento, la tabla de datos y los cálculos realizados se encuentran en el [Apéndice B](#).

²Ver [Nota a pie de página 1](#)

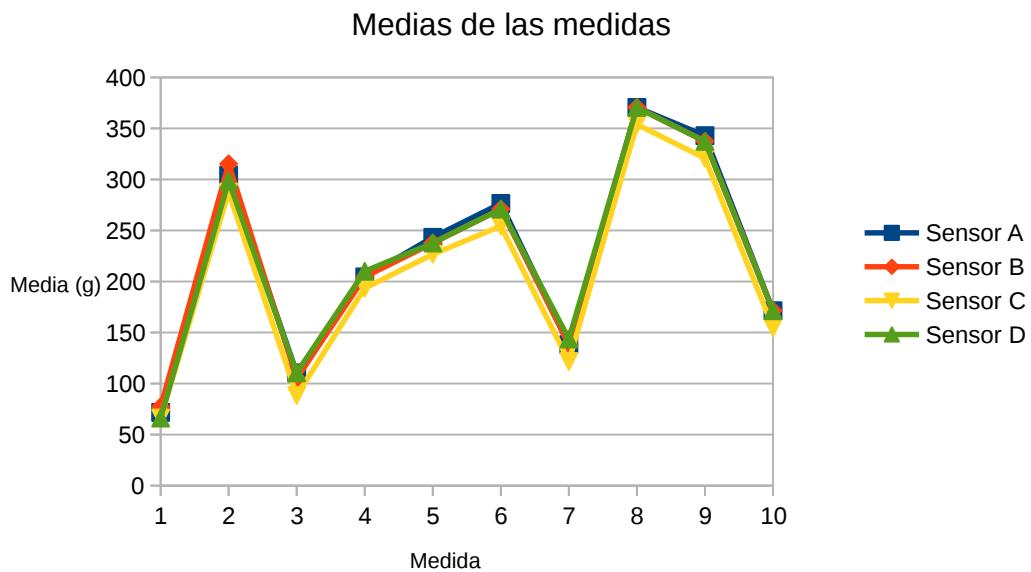


Figura 7.1: Valores medios de las medidas de los sensores de fuerza.

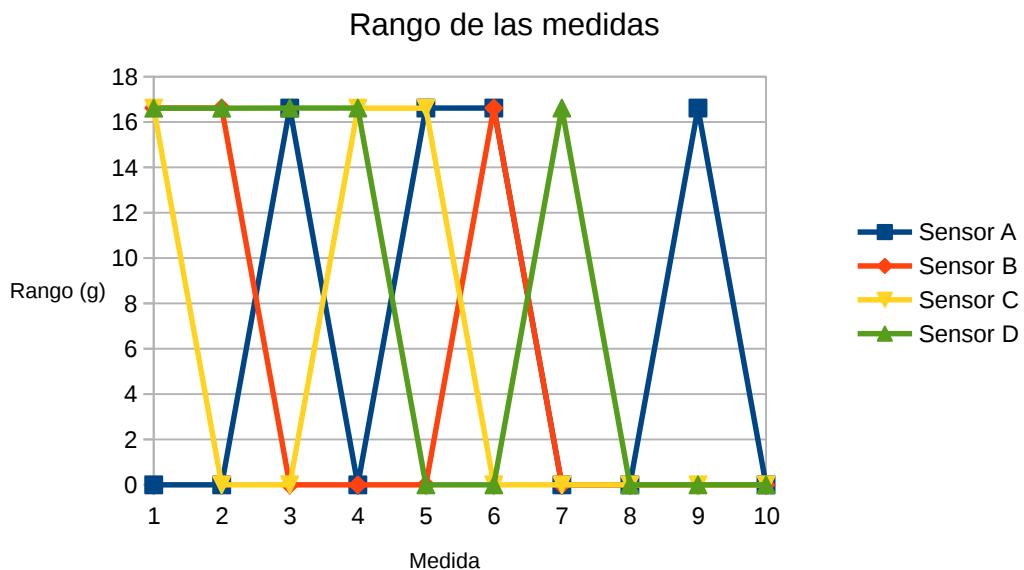


Figura 7.2: Rangos de las medidas de los sensores de fuerza.

Desviación típica	Porcentaje con respecto a TV
$EV = 4,049$	$\%EV = 4,329$
$AV = 7,382$	$\%AV = 7,894$
$GRR = 8,420$	$\%GRR = 9,003$
$PV = 93,146$	$\%PV = 99,594$
$TV = 93,526$	

Tabla 7.1: Resultados del análisis GRR de los sensores de fuerza.

7.3.2. Sensor de presión

La [Figura 7.3](#) muestra que las medias de los valores obtenidos con ambos sensores para cada nivel de agua se encuentran muy próximos. Éste es el comportamiento esperado y nos indica que los sensores ofrecen una buena reproducibilidad. El análisis gráfico de los rangos de las medidas ([Figura 7.4](#)) señala que la repetibilidad de los sensores es buena ya que los valores mostrados son de un orden de magnitud menor que las medidas que se esperan tomar.

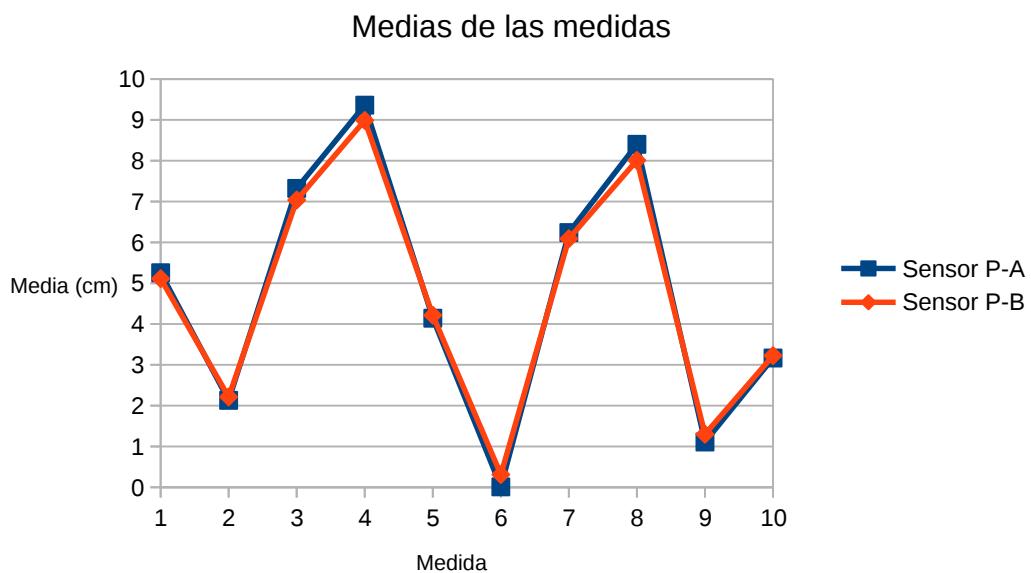


Figura 7.3: Valores medios de las medidas de los sensores de presión.

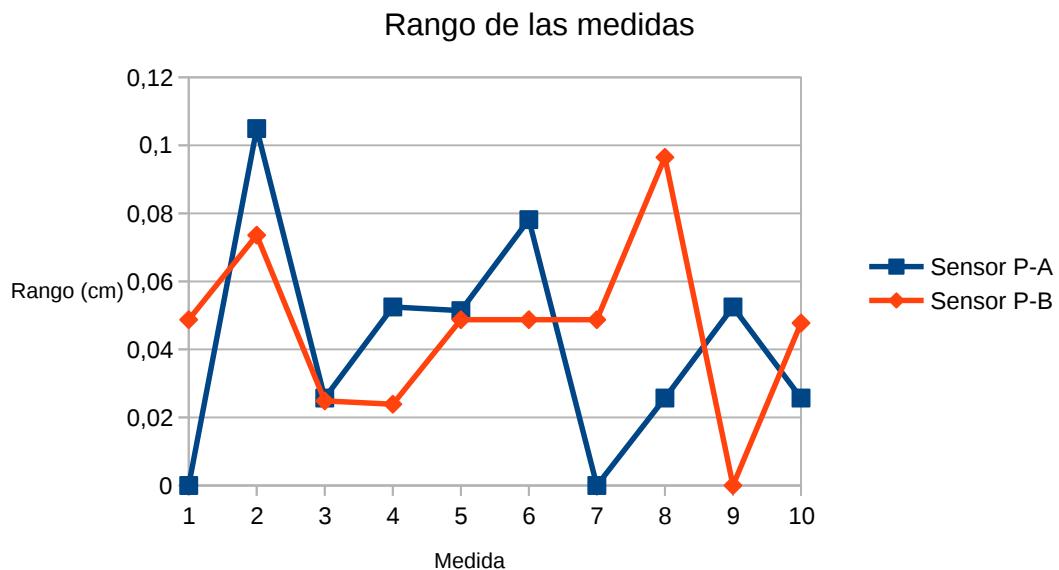


Figura 7.4: Rangos de las medidas de los sensores de presión.

La [Tabla 7.2](#) refleja los resultados del estudio numérico de las medidas tomadas.³ Observamos que las desviaciones típicas EV y AV son mucho menores que las señales que esperamos medir y que (como indica el valor de $\%GRR$) los errores de repetibilidad y reproducibilidad se encuentran por debajo del 10 %, señalando que los sensores son adecuados para nuestro rango de medida.

Desviación típica	Porcentaje con respecto a TV
$EV = 0,0259$	$\%EV = 0,915$
$AV = 0,0451$	$\%AV = 1,589$
$GRR = 0,052$	$\%GRR = 1,834$
$PV = 2,835$	$\%PV = 99,983$
$TV = 2,836$	

Tabla 7.2: Resultados del análisis GRR de los sensores de presión.

³Ver [Nota a pie de página 1](#)

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo futuro

Como último capítulo de esta memoria se recogen las conclusiones del proyecto. Así mismo se realiza una valoración del trabajo realizado y se muestran las posibles vías para un futuro desarrollo.

8.1. Conclusiones

Si bien el estudio experimental sobre rotura de presas no ha finalizado todavía, el sistema de control de sensores y actuadores se puede considerar finalizado. El objetivo propuesto se puede afirmar que ha sido alcanzado tras realizar una serie de pruebas satisfactorias de medida en el canal, por lo que el sistema desarrollado se seguirá utilizando para realizar las medidas necesarias para proseguir con el estudio.

De cara a alcanzar la meta planteada, éste se dividió en varios objetivos menores, que se han ido completando hasta obtener un sistema de medida completo y funcional. A continuación se enumeran los mismos, todos han sido alcanzados a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Estudio de los sensores y actuadores. Fase completada tras analizar los sensores y actuadores utilizados en el estudio de rotura de presa, así como su calibración y la adecuación de sus señales. ([Capítulo 3](#))

Investigación sobre los sistemas de control de posición. Se realizó un análisis de los sistemas que permiten fijar la posición de los elementos en un experimento y se estudió el caso concreto de los sistemas *CNC*. ([Capítulo 4](#))

Ánalisis del software y hardware de adquisición de datos. Este objetivo se puede considerar completado tras estudiar los principios fundamentales del software *LabView* y el principio de funcionamiento de los sistemas de adquisición de datos ([Capítulo 5](#))

Implementación con *LabView* del sistema automático. Para alcanzar esta meta se crearon una serie de programas que se encargan de automatizar la calibración, captura y procesado de datos. ([Capítulo 6](#))

Montaje de un sistema físico real en el canal. Una vez completados los anteriores pasos, se procedió al ensamblaje de todos los elementos en el canal experimental a escala y se tomaron una serie de medidas en el contexto del estudio de rotura de presa. ([Capítulo 2](#))

Comprobación de la adecuación del sistema de medida. Se ha realizado un examen de los sensores mediante el método GRR para asegurar que los sensores son aptos para las medidas que se van a realizar. ([Capítulo 7](#))

Documentación En paralelo con la consecución de los anteriores objetivos se ha confeccionado esta memoria para dejar constancia de todo el proceso.

8.2. Trabajo futuro

A pesar de que el proyecto ha finalizado satisfactoriamente, existen ciertos aspectos que se podrían refinar. A continuación se detallan algunas de las mejoras que se podrían desarrollar como líneas de trabajo futuro:

- Implementar la captura de imágenes del experimento mediante una o más cámaras. Actualmente la captura de imágenes durante el experimento tiene lugar mediante otro ordenador, esta tarea podría implementarse también mediante *Lab View* para conseguir una mejor sincronización.
- Corregir errores de medida del sensor de nivel mediante el rediseño de la electrónica. Las medidas presentan un error de *offset* que ha de ser corregido posteriormente. El sensor debería ser rediseñado para corregir este comportamiento.
- Utilizar el sistema de posicionamiento CNC en un experimento real en el canal.