



Escuela de Ingeniería

Ingeniería Civil Eléctrica

Medición de la velocidad del flujo de agua en canal utilizando una celda de carga.

Álvaro Isaac Henríquez Vega

Profesor guía: Enrique Ortiz

Profesor Co-guía: Daniel Casagrande

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile

Enero 2024

Agradecimientos

Quiero expresar de corazón mi profundo agradecimiento a Sofía, quien ha sido un pilar fundamental a lo largo de estos años de carrera. Tu apoyo incondicional y sus constantes palabras de aliento fueron cruciales para no bajar los brazos en momentos difíciles. Tu presencia ha hecho una diferencia importante tanto en mi trayectoria universitaria como en mi vida, gracias por siempre haber estado conmigo.

Adicionalmente, quisiera agradecer a mi familia, quienes me han ayudado de diversas maneras a lo largo de toda mi vida para alcanzar cada objetivo que me he propuesto.

También, me gustaría agradecer de manera especial a mis amigos de universidad, quienes siempre estuvieron presentes cuando necesité ayuda.

Finalmente me gustaría expresar mis agradecimientos a cada profesor que formó parte de mi carrera. En particular, a los Profesores Daniel Casagrande y Enrique Ortiz, quienes confiaron en mí para el desarrollo de esta memoria.

Índice

Agradecimientos.....	2
Índice	3
Resumen	5
1. Introducción	6
2. Objetivos.....	9
2.1 Objetivo general	9
2.2 Objetivos específicos	9
2.3 Alcances y limitaciones	9
3. Marco teórico	10
3.1 Flujo en canales abiertos	10
3.1.1. <i>Flujo laminar y turbulento</i>	10
3.1.2. <i>Velocidad</i>	11
3.1.3. <i>Caudal</i>	13
3.1.4. <i>Fuerza de arrastre</i>	13
3.2 Galga extensiométrica	14
3.2.1. <i>Puente de Wheatstone</i>	16
3.2.2. <i>Celda de carga</i>	17
3.2.3. <i>Calibración</i>	18
4. Marco metodológico	19
4.1 Etapa 1	19
4.2 Etapa 2.....	19
4.3 Etapa 3.....	20
4.4 Etapa 4.....	21

4.5	Etapa 5.....	21
5.	Pruebas experimentales y resultados	23
5.1	Montaje experimental.....	23
5.2	Prototipo para medición de velocidad	24
5.3	Sistema de adquisición	26
5.4	Calibración celda de carga	31
5.5	Construcción del sistema de medición de velocidad	33
5.6	Resultados experimentales	35
5.7	Validación de datos	38
	Conclusión	45
	Trabajo futuro	47
	Referencias.....	48
	Anexos.....	51

Resumen

La escasez de agua que se aproxima para el futuro es un problema que afecta a todas las personas. Particularmente, la agricultura es uno de los mayores consumidores de agua, es por ello, que se vuelve necesario medir la velocidad del agua en canales abiertos ya que es un parámetro fundamental para obtener el caudal de agua extraída. El propósito de esta memoria consiste en desarrollar un sistema capaz de medir la velocidad del flujo de agua que circula a través de un canal a escala utilizando una celda de carga. Se construyó un sistema robusto compuesto principalmente por PLA y madera de terciado, diseñado para resistir la fuerza generada por el flujo. El sistema incluye una celda de carga de 200 g, la cual es acoplada a una esfera que se sumerge en el flujo de agua, experimentando así una fuerza de arrastre que se transmite a la celda, cuyos datos fueron procesados mediante una placa de desarrollo de Arduino Mega 2650 para determinar la velocidad del flujo.

En la fase experimental del proyecto, se llevaron a cabo tres mediciones a diferentes ángulos de inclinación del canal, evidenciando un incremento en la velocidad del flujo a medida que aumentaba el ángulo de inclinación. Los datos recopilados fueron posteriormente comparados con una validación de datos, utilizados para obtener la velocidad media y superficial del flujo. Finalmente, los resultados permitieron concluir que el sistema de medición demostró lecturas coherentes y estables.

Palabras claves: Sistema de medición, velocidad, flujo de agua, canal abierto, celda de carga

1. Introducción

El agua es un recurso hídrico cada vez es más escaso, la magnitud de la demanda de agua ya supera la oferta en distintas partes del mundo y se estima que este desequilibrio siga en aumento conforme la población mundial continúe creciendo [1]. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) pronostica que al año 2050, cerca de 36% de la población mundial vivirá en regiones con escasez hídrica y el 52% experimentará una grave escasez de agua [2], es por ello que se están tomando medidas drásticas para disminuir estos porcentajes.

A nivel mundial la agricultura representa la mayor proporción de consumo de agua, alcanzando un 70%, lo cual varía dependiendo del clima y del lugar que ocupa la agricultura en la economía en cada país [3]. En particular, Chile se caracteriza por su actividad agrícola en las zonas centro y sur, extrayendo aproximadamente un 80% de recursos hídricos provenientes principalmente de ríos y esteros. Estos recursos, en la mayor parte de ocasiones, son distribuidos a través de canales abiertos sin control, ya que la distribución del agua se realiza solo por medio de acciones o derechos que personas tienen sobre aguas superficiales [4].

Dada esta situación, es necesario conocer la cantidad de agua que fluye a través de cada canal para optimizar y lograr una eficiente administración de los recursos hídricos. En este sentido, medir la velocidad del flujo se convierte en un parámetro esencial para cuantificar la cantidad de fluido que se traslada por un canal.

Actualmente, se cuenta con el sistema de velocimetría PIV (Particle Image Velocimetry) [5], el cual utiliza captura imágenes de partículas suspendidas en el flujo para medir la velocidad del fluido. Este método destaca por no ocasiona perturbaciones en el transcurso natural del flujo. El sistema incorpora un láser que proyecta una lámina de luz de ubicada en el centro y Paralela a las paredes del canal. Al introducir las partículas trazadoras al flujo pasan a través de la lámina y con una cámara CCD captura imágenes mientras las partículas cruzan el

área definida por la lámina. Posteriormente, estas imágenes se procesan en una unidad de procesamiento, donde se obtiene la velocidad del flujo mediante el análisis de la distancia recorrida por las partículas y el tiempo requerido.

Otro sistema de medición es el molinete hidráulico [6], un dispositivo diseñado para medir la velocidad de flujos en puntos específicos del área transversal del canal, permitiendo obtener perfiles de velocidad a diferentes alturas. Este dispositivo consta de una hélice de aluminio, donde se instala un imán en un extremo y un contrapeso en el otro para evitar desbalances durante el giro. Además, incorpora un sensor ubicado cerca del imán para captar el paso de este cuando está expuesto a la energía del flujo, obteniendo la velocidad de rotación, la cual es proporcional a la velocidad del flujo. El molinete es montado en el extremo de un soporte en forma de varilla, facilitando al usuario la manipulación del instrumento durante las mediciones y en el otro extremo, se encuentra un ciclocomputador que almacena la información y lo convierte a velocidad.

Por último, en el año 2019 se llevó a cabo un estudio para monitorear en tiempo real la velocidad del flujo de agua en tuberías. Se desarrolló un modelo tecnológico denominado “Mm-sized resistance type sensor film” (MRSF) [7], que es un sensor resistivo conformado por una película plana, flexible y de tamaño milimétrico. La particularidad de este sensor radica en su facilidad de instalación, ya que se puede ubicar en un punto aleatorio en la tubería y de manera perpendicular a la dirección del flujo. Cuando la película entra en contacto con el flujo, la película experimenta una deflexión ocasionada por la energía del flujo, y a su vez, la resistencia eléctrica cambia, estableciendo una relación con la velocidad del flujo.

Para efectos de esta memoria no se encontraron sistemas de medición de velocidad para flujos en canales abiertos a baja escala. Por lo tanto, se propuso desarrollar un sistema de medición de flujos inspirado en el molinete hidráulico y el sensor MRSF. El molinete hidráulico

fue clave para idear una forma capaz de obtener el perfil de velocidad de manera automatizada. Por otro lado, el sensor MRSF sirvió de inspiración para decidir el tipo de sensor a utilizar, ya que la película plana hace referencia a galga extensiométrica, las cuales son adheridas a celdas de cargas.

El sistema de medición utiliza una celda de carga fijada a una base de acrílico y ubicada de manera perpendicular al flujo, la celda es unida a una esfera mediante un acople de impresión 3D más una varilla lisa, la esfera es sumergida en el flujo de agua a diferentes alturas a partir del fondo del canal para experimentar la fuerza de arrastre con el flujo. Dicha fuerza de arrastre es transmitida a la celda de carga y las lecturas de fuerza son convertidas a velocidad para poder establecer un perfil de velocidad del fluido que circula por el canal abierto. Los puntos de medición se determinaron a la condición que siempre la esfera debe estar completamente sumergida en el flujo y se debe medir a partir de los 3 milímetros desde el fondo del canal.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo es desarrollar un sistema capaz de medir la velocidad del agua que circula a través de un canal abierto mediante una celda de carga.

2.2 Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de control electrónico para que el sistema de medición pueda realizar mediciones en el eje vertical.
- Elaborar un prototipo de medición de velocidad de fluidos que se pueda implementar en un canal.
- Validar el sistema de medición.

2.3 Alcances y limitaciones

- El sistema se limita a medir únicamente la velocidad del flujo en un canal de pruebas.
- Se emplea exclusivamente agua como fluido, la cual es distribuida a través de un circuito que contiene una bomba de agua, a la que es posible controlar su velocidad de giro por medio de un variador de frecuencia, con el fin de simular el comportamiento natural del agua y demás, variar la velocidad del flujo a través del canal.
- El sistema presenta características enfocadas en un diseño que garantiza su fácil transporte, resistencia ante la fuerza de arrastre del fluido y posee un funcionamiento simple.

3. Marco teórico

3.1 Flujo en canales abiertos

El flujo en un canal abierto [8] se caracteriza por estar sometido a la presión atmosférica, dado que la superficie del fluido se encuentra expuesta al ambiente. Esta exposición, junto con el desnivel del canal tanto aguas arriba como aguas abajo, incita al desplazamiento del fluido a partir de su peso (fuerza de gravedad) y no a partir de una diferencia entre presiones, como es el caso en conductos cerrados.

A medida que el flujo avanza a través del canal con una pendiente y sección transversal constantes, experimenta una aceleración hasta que la pérdida de carga debido a la fricción se iguala a la caída de elevación. En ese instante, el fluido alcanza el régimen permanente y se determina como un flujo uniforme. Este régimen se mantiene hasta que la pendiente, la sección transversal o la rugosidad del canal sufran alguna alteración [9].

Los flujos en canales abiertos se pueden clasificar como flujos uniformes y no uniformes, lo cual depende principalmente de la altura del flujo (desde el fondo hasta la superficie). Si la altura del flujo no cambia a través del tiempo (la velocidad media tampoco sufre alteraciones), se cataloga como un flujo uniforme. Por el contrario, si la altura del flujo varía a través del tiempo, se dice que corresponde a un flujo no uniforme.

3.1.1. Flujo laminar y turbulento

El comportamiento del flujo en fluidos es un fenómeno importante en diversas áreas. La principal característica que distingue el flujo laminar del turbulento radica en la organización del movimiento a través de un canal abierto o cerrado.

Se entiende flujo laminar cuando las partículas adyacentes del fluido se ordenan de tal manera que se forman "láminas" paralelas que se desplazan de forma alineada a través del

canal. Es común que estas situaciones se presenten en flujos que se desplazan a una velocidad baja.

Se entiende como flujo turbulento cuando las partículas del fluido siguen una trayectoria irregular, ocasionando que las partículas choquen entre sí, formando remolinos a diferentes escalas y magnitudes en su desplazamiento. Este tipo de flujos es ocasionado cuando el flujo se desplaza a altas velocidades [10].

La figura 1 ilustra lo mencionado anteriormente, donde se puede identificar el comportamiento lineal característico de los flujos laminares. Por otro lado, el flujo turbulento presenta un desorden en la trayectoria de sus partículas, dando lugar a la formación de remolinos y turbulencias entre sí.

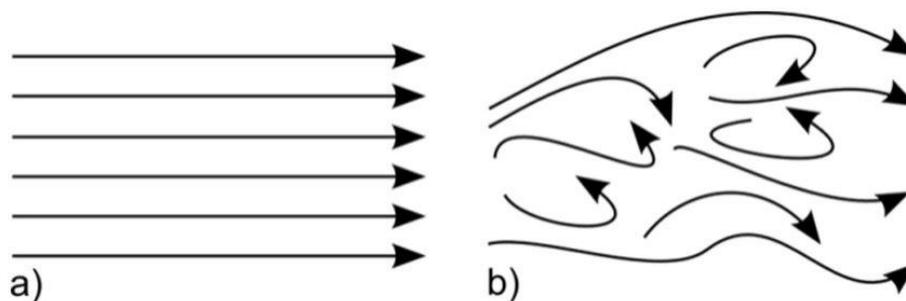


Figura 1: Representación de (a) flujo laminar y (b) turbulento [11].

3.1.2. *Velocidad*

En la mayor parte de los casos prácticos, la velocidad del flujo en canales abiertos no se mantiene constante a lo largo de toda su área transversal. Más bien, experimenta variaciones significativas en diferentes puntos de su área, donde en algunos casos la velocidad puede disminuir y aumentar en otros [12].

La máxima velocidad del flujo se presenta abajo de la superficie, específicamente en un punto cercano al 25% de profundidad en la vertical del centroide del área transversal. Por otra parte, la

velocidad mínima del flujo se presenta en las paredes laterales y en la base del canal, esto se produce por el efecto conocido como condición de no deslizamiento [13], el cual establece que la velocidad del flujo al entrar en contacto con alguna superficie sólida, se genera una fuerza de fricción viscosa que detiene a la lámina de fluido que se encuentra en contacto con esa región, obteniendo una velocidad nula en ese punto.

En la figura 2 se logra apreciar como un flujo uniforme al entrar en contacto con una placa, la cual desacelera a la capa de flujo, a la capa siguiente y así sucesivamente. Con esta ilustración se demuestra la condición de no deslizamiento debido a las fuerzas viscosas.

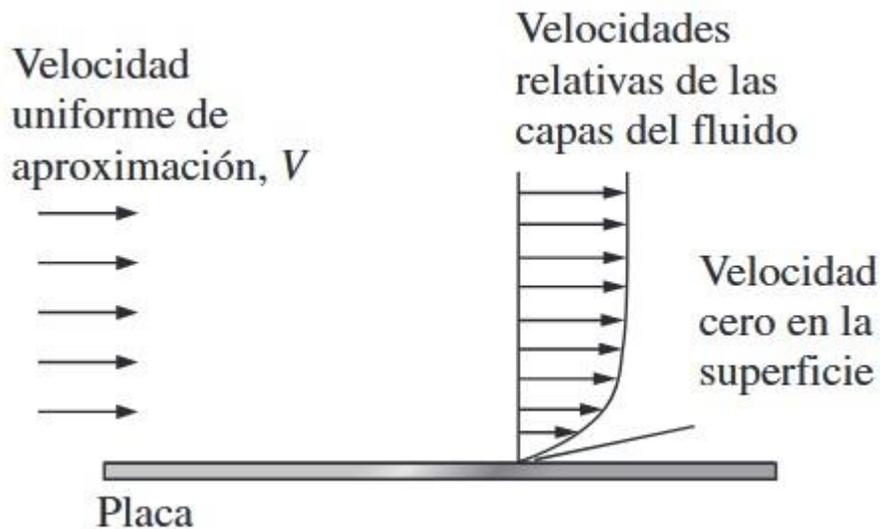


Figura 2: Perfil de velocidad de un canal abierto [12].

Como se puede apreciar en la figura 2, la velocidad tiende a mantenerse relativamente constante a medida que la velocidad del flujo se aproxima a la superficie, que no necesariamente corresponde a la velocidad máxima del flujo. Esta velocidad es conocida como “velocidad superficial”, la cual se puede determinar mediante el método flotante [14]. Este método implica definir una distancia razonable (preferiblemente mayor para una mayor

precisión), seleccionar un objeto flotante y medir el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Al obtener la información, se pueden reemplazar en la ecuación 1 para obtener la velocidad superficial.

$$v_s = \frac{d}{t} \quad (1)$$

donde, d (m) es distancia y t (s) es el tiempo.

3.1.3. Caudal

El caudal [15] se define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección transversal de un canal por unidad de tiempo. Es decir, el caudal se puede considerar como la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

donde, V (m³) corresponde al volumen y t (s) corresponde al tiempo.

Otra expresión para calcular el caudal, relaciona al área de la sección transversal del flujo con su velocidad media. Lo cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

Donde v (m/s) corresponde a la velocidad media del flujo y A (m²) corresponde al área de la sección transversal.

3.1.4. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre es una fuerza neta que se origina a partir de la presión y a las fuerzas de fricción que enfrenta un cuerpo estacionario al estar en contacto con el desplazamiento de un fluido o viceversa. Ambas situaciones son mutuamente equivalentes, siendo fundamental la ocurrencia de un movimiento relativo entre el cuerpo y el fluido [16].

La fuerza de arrastre se expresa de la siguiente manera:

$$F_D = \frac{1}{2} C \rho A v^2 \quad (4)$$

donde C es el coeficiente de arrastre, A (m) es el área del objeto que se encuentra en contacto con el fluido, ρ (kg/m³) es la densidad del fluido y v (m/s) es la velocidad media del fluido. Esta ecuación permite caracterizar la fuerza de arrastre que experimenta un cuerpo en presencia de un fluido en movimiento.

Se debe tener en cuenta que cada cuerpo geométrico posee un coeficiente de arrastre único, mientras menor sea la perturbación que le genera al flujo, menor será el coeficiente de arrastre hacia él. Por ejemplo, cuando una esfera enfrenta a un flujo con su área transversal, el coeficiente de arrastre es 0,4, pero si se trata de un cuerpo de cara plana, el coeficiente de arrastre es 1,2 triplicando a la esfera [12]

Los cuerpos geométricos, cuando interactúan con el flujo, las moléculas del fluido se adhieren a la superficie del objeto por el efecto de capa límite, aumentando su coeficiente de resistencia. Por ejemplo, cuando se trata de cuerpos sustentadores, este conforme a su área transversal de ataque redondeada y un borde de salida agudo, desprende su capa límite, reduciendo la división del flujo y su coeficiente de arrastre frontal [17].

3.2 Galga extensiométrica

Una galga extensiométrica es un sensor resistivo que se basa en el efecto piezorresistivo [18]. Este fenómeno consiste en variar su resistencia eléctrica cuando la galga se somete a deformaciones ocasionadas por tensión mecánica, la cual se divide en la fuerza de tracción y compresión. Cuando la galga recibe una fuerza de compresión, el área de la sección transversal del alambre aumenta, pero su resistencia eléctrica disminuye. En caso contrario,

cuando se aplica una fuerza de tensión, el área de la sección transversal del alambre disminuye y su resistencia eléctrica aumenta [19].

La figura 3, muestra la estructura de una galga extensiométrica donde se puede apreciar una base aislante de material flexible en el cual se monta un fino alambre resistivo de constantan que concluyen en ambos extremos con un terminal de soldadura para poder unir los terminales de cobre y así, obtener su posterior lectura sobre la información recopilada.

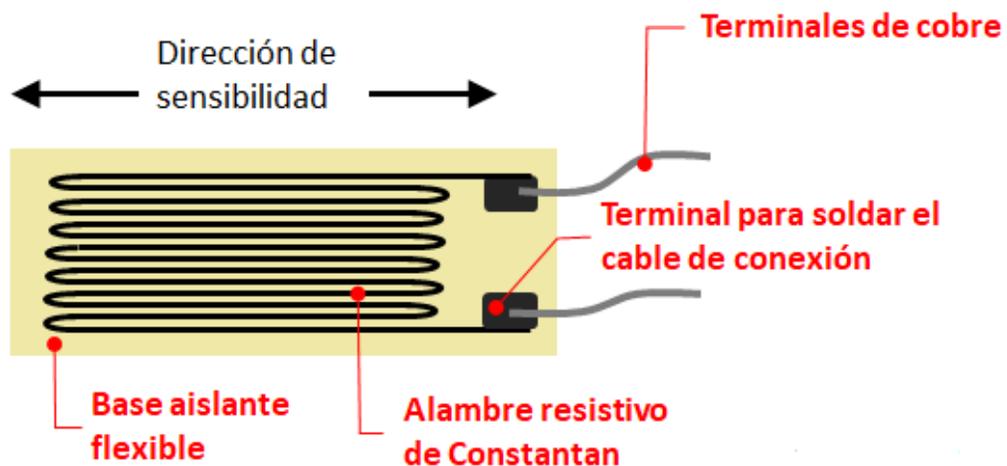


Figura 3: Galga extensiométrica uso uniaxial [19].

El parámetro fundamental de la galga extensiométrica es la sensibilidad a la deformación, la cual se denota como el factor de galga extensiométrica GF (por sus siglas del inglés *gauge factor*) y se cuantifica mediante la siguiente ecuación:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (5)$$

donde, R (ohm) es la resistencia eléctrica de fábrica, ΔR es el cambio en la resistencia eléctrica y ε (me) es la tensión de deformación. La relación que se genera entre el cambio en la

resistencia y la deformación en la longitud del conductor, se refleja de forma precisa a través de la ecuación (5), facilitando la comprensión de los resultados de manera experimental.

Las galgas extensiométricas se adhieren a cuerpos geométricos que presentan superficies planas, como bloques de acero o aluminio. Esta unión se efectúa en puntos específicos, donde la galga pueda captar de manera óptima la fuerza aplicada en el bloque. Los transductores fabricados de esta manera reciben el nombre de celdas de carga.

3.2.1. Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito eléctrico desarrollado para identificar cambios en las resistencias eléctricas con un alto nivel de precisión, mediante la variación de voltaje que se produce en un punto específico del circuito. Este dispositivo es capaz de detectar variaciones mínimas de voltaje (milivolts), las cuales se pueden producir debido a la sensibilidad de la resistencia ante variaciones de la temperatura ambiente o por fuerzas externas que afectan al valor de su resistencia eléctrica.

En la figura 4, se aprecia el circuito eléctrico del puente de Wheatstone, donde se conectan dos pares de resistencias en serie que son conectadas en paralelo. Este conjunto de resistencias se alimenta por una fuente de tensión que se conecta en los puntos A y C, mientras V_G mide la diferencia de potencial entre los puntos D y B. Las resistencias R_1 y R_3 son resistencias fijas y conocidas, R_2 es una resistencia variable que se puede modificar y por último, R_x es la resistencia cuyo valor se desconoce.

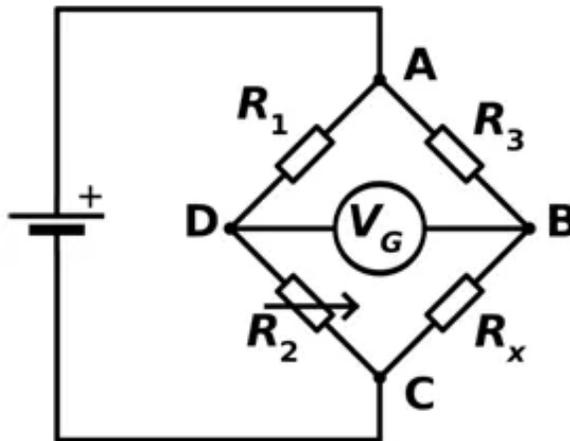


Figura 4: Puente de wheatstone.

El puente de Wheastone fue diseñado para estar balanceado en V_G , es decir, el voltaje medido entre los puntos B y D debe ser igual a cero. Cuando la resistencia desconocida sufre alguna perturbación en su resistencia, desbalancea el puente y a su vez, el voltaje V_G cambia de manera proporcional. Para volver al estado de balanceo, se debe ajustar la resistencia variable R_2 de manera que el voltaje regrese a cero.

Las galgas extensiométricas requieren detectar mínimas variaciones en su resistencia para garantizar una medición precisa y confiable en cada aplicación. Por ello, se utiliza en un puente de Wheatstone, donde pueden ocupar una, dos o las cuatro resistencias, según sea necesario. En situaciones donde se reemplaza una o dos resistencias, las resistencias restantes serán fijas y de alta precisión, para mantener la exactitud en cada perturbación.

3.2.2. Celda de carga

Las celdas de carga se definen como transductores, es decir, dispositivos que convierten algún parámetro mecánico (tensión, torsión, presión, momentos) en señales eléctricas. El término “celda” es utilizado de forma conveniente para describir un transductor compacto. Las

celdas de carga integran galgas extensiométricas en posiciones específicas para que cuando la celda de carga sea sometida a alguna fuerza o peso, esa deformación también sea transmitida a las galgas extensiométricas y así, lograr medir esas variaciones [20]. Un dato importante, está en que estas celdas son fabricadas de aluminio, por lo que poseen un valor de mercado accesible para cualquier usuario.

3.2.3. Calibración

La calibración es un proceso necesario para obtener mediciones acordes a los valores de referencia, ya que ninguna celda de carga sale al mercado calibrada. Los pasos para su calibración se describen a continuación:

- 1) Se posiciona la galga extensiométrica sobre una superficie estable para evitar que influyan perturbaciones externas.
- 2) Se establece una conexión entre la celda de carga y un amplificador, un punto fundamental para acondicionar la señal de manera que pueda ser procesada por un microcontrolador junto con su respectivo software.
- 3) Se selecciona una fuerza conocida que se le aplica a galga, generando una deformación controlada.
- 4) Finalmente, se realiza un promedio de un rango de muestras razonables y se divide en la fuerza conocida. El valor resultante se agrega al software, culminando con la calibración.

De forma opcional, se puede seguir calibrando la galga extensiométrica de manera iterativa con el fin de reducir la histéresis y regular su comportamiento ante diferentes fuerzas.

4. Marco metodológico

La metodología empleada en esta memoria se estructura en diversas etapas, abordando cada tema con rigurosidad, con el fin de obtener resultados concisos. En la figura 5 se establecen las principales etapas que fueron necesarias para cumplir con la finalidad del trabajo.



Figura 5: Estructura de principales etapas metodológicas.

Cada una de las etapas mencionadas en la figura 5, se detallan a continuación.

4.1 Etapa 1

En la etapa inicial del proyecto, se llevó a cabo una búsqueda en diversas bases de datos académicas, centradas en sistemas de medición de velocidad utilizados para flujos en canales abiertos. Esta búsqueda fue realizada en base a las principales características que cada sistema debe incorporar, tales como un bajo coste, transportable y de fácil manipulación. Con la información recopilada, se logró obtener una visión clara de cómo elaborar el sistema de medición, teniendo en cuenta que también se debe adaptar al canal experimental.

4.2 Etapa 2

La etapa del diseño es crucial para que la construcción del sistema de velocidad se pueda ejecutar de manera eficiente. Dicho esto, se determinaron diversas características fundamentales para garantizar un correcto funcionamiento. Estas características fueron las siguientes:

- Cuerpo geométrico resistente: Se debe determinar un cuerpo geométrico capaz de resistir la fuerza de arrastre del flujo y no ocasionar alteraciones significativas en el medio (turbulencia).
- Sistema de elevación: Se debe considerar un sistema capaz de elevar y descender el cuerpo geométrico. Esto permite realizar mediciones a diferentes alturas del flujo.
- Sistema robusto y portable: El sistema debe ser robusto y portátil, capaz de resistir la fuerza de arrastre del flujo sin perder estabilidad.

Con los requerimientos fundamentales para la elaboración del sistema de medición claramente definidos, se procedió a realizar una búsqueda de posibles sistemas que cumplieran con cada uno de estos requisitos para servir de inspiración, la cual fue un elevador de vehículos de cuatro columnas [21].

Particularmente, cada diseño y sus respectivas modificaciones se llevaron a cabo en el programa Autodesk Fusion 360 para entregar una visión virtual de los materiales a utilizar, identificar la ubicación de cada elemento y anticiparse a posibles complicaciones en el montaje del prototipo.

4.3 Etapa 3

La construcción del sensor se realiza a base de las especificaciones detalladas en los diseños 3D y 2D efectuados en el inciso anterior. Una vez adquiridos los materiales por medio de compras, impresiones 3D en PLA (ácido poliláctico) y el dimensionado de materiales realizado mediante la cortadora láser, se procede al ensamblaje del sistema de velocidad. Este proceso es fundamental para la posterior implementación en el canal de pruebas.

4.4 Etapa 4

Se recolectaron muestras en el flujo del canal utilizando el sistema de medición de velocidad, a diferentes alturas dentro del área transversal, a diferentes velocidades del flujo y a diferentes inclinaciones del canal experimental. Todas estas mediciones se realizaron específicamente en el punto medio del área transversal del flujo, pero exclusivamente en el eje vertical.

La obtención de datos mediante el sistema de medición se llevó a cabo principalmente mediante una celda de carga y un microcontrolador de Arduino. Al operar el sistema de medición para realizar las mediciones, la celda proporciona datos en unidades de voltaje cuando experimenta deformaciones al entrar en contacto con la fuerza de arrastre del flujo. Posteriormente, estos datos son procesados por un código de Arduino que realiza conversiones de unidades y operaciones matemáticas para obtener la velocidad del flujo, utilizando la ecuación (4).

4.5 Etapa 5

La validación de los datos se llevó a cabo mediante registros prácticos que incluyeron cálculos teóricos para asegurar la consistencia de las mediciones del sistema de medición. Se utilizaron dos métodos, cada uno ejecutado meticulosamente para proporcionar una validación integral y confiable, los cuales serán descritos a continuación.

El primer método consistió en utilizar la ecuación (2) y (3) para obtener la velocidad del flujo. Es importante destacar que se calculó el promedio de todas las muestras realizadas. Primero se recopilieron 10 muestras de tiempo para determinar el lapso requerido para el paso de 20 litros de agua a través del caudalímetro (ver Anexo 1). Posteriormente, para identificar la altura del flujo, se capturaron 10 imágenes utilizando una cámara, un trípode y una regla

adherida a la pared del canal, manteniendo constante la posición de estos tres elementos para todas las muestras. Con el lapso de tiempo listo y la conversión de los 20 litros a metros cúbicos, es posible utilizar la ecuación (2) para calcular el caudal. Finalmente, como se conocen las dimensiones del canal y además, se tiene la altura del flujo, se puede obtener el área transversal para ser implementada junto al caudal en la ecuación (3), obteniendo la velocidad del flujo.

La segunda medición se enfocó en obtener la velocidad superficial del flujo utilizando el método flotante descrito en la sección 3.1.2. Para este método se utilizó un trozo de madera de 15 x 10 x 3 mm y se tomó el tiempo que tardó en recorrer la distancia de un metro. Se realizó el promedio de 10 muestras, obteniendo la velocidad superficial.

5. Pruebas experimentales y resultados

5.1 Montaje experimental

El sistema de pruebas se establece como un circuito cerrado para llevar a cabo experimentos con el sistema de velocidad. Cabe recalcar que durante la fase experimental se optó por utilizar agua como fluido.

El diseño del sistema de pruebas se caracteriza por utilizar un variador de frecuencia monofásico, pero con salida trifásica (ver Anexo 1), el cual se utiliza para energizar una bomba trifásica de 3 HP (ver Anexo 2). El variador tiene la capacidad de variar su frecuencia de forma manual, permitiendo modificar la velocidad del flujo de manera rigurosa. La bomba, a su vez, absorbe el agua del tanque a través de un sistema de tuberías equipadas con llaves de paso de 1 y 2 pulgadas, y además, se incorpora un caudalímetro de dos pulgadas (ver Anexo 3), para realizar mediciones exactas del caudal en tiempo real.

Las tuberías dirigen el agua hacia el canal de pruebas de acrílico de 174 x 5,8 x 35 cm (ver Anexo 4). En la parte inferior de este canal, hay un estanque por donde el fluido ingresa. Cuando el estanque se rebalsa con el agua, el flujo circula a través del canal por gravedad, permitiendo que se puedan efectuar los experimentos. Finalmente, el flujo de agua regresa al tanque de agua principal, cerrando el circuito y permitiendo que el sistema funcione de manera continua y sin desperdiciar agua.

Este sistema integral, garantiza un ambiente controlado y eficiente para analizar el comportamiento del sistema de velocidad en condiciones reales. En la Figura 6, se pueden apreciar todos los componentes mencionados anteriormente, lo cual es clave para comprender su funcionamiento.

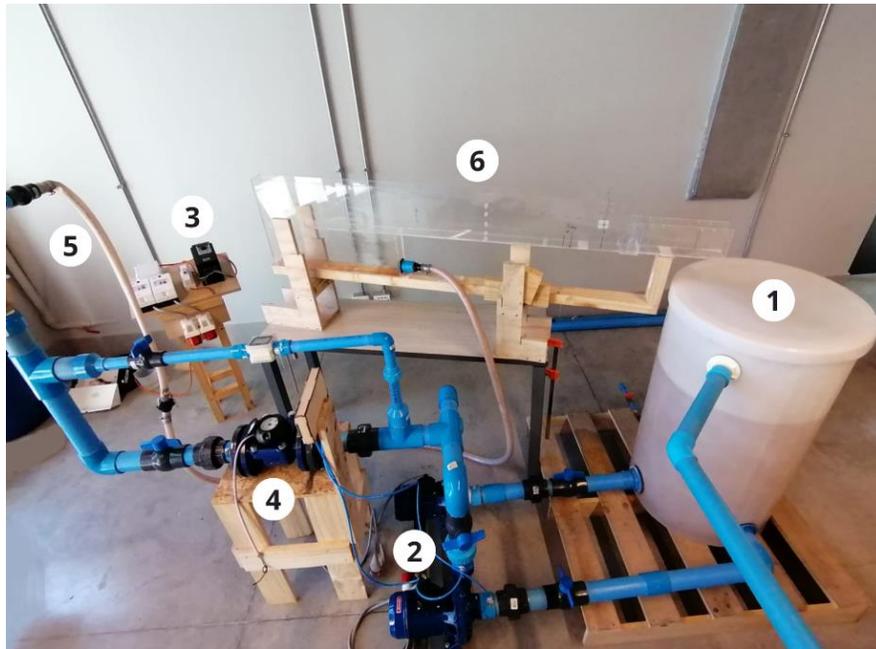


Figura 6: Montaje experimental.

- (1) Estanque de agua de 200 L.
- (2) Bomba de agua de 1HP (SCF1 100T).
- (3) Variador de frecuencia (AE200H).
- (4) caudalímetro 2''.
- (5) Manguera 1''.
- (6) Canal de pruebas.

5.2 Prototipo para medición de velocidad

Se realizaron mediciones rigurosas tanto del canal como de los posibles materiales a implementar. El conjunto de mediciones desempeñó un rol fundamental en la elaboración de diversos diseños preliminares, los cuales sirvieron de aprendizaje para cumplir con las características predefinidas. En la figura 7, se ilustra el diseño final del sistema de medición de velocidad para canales abiertos.

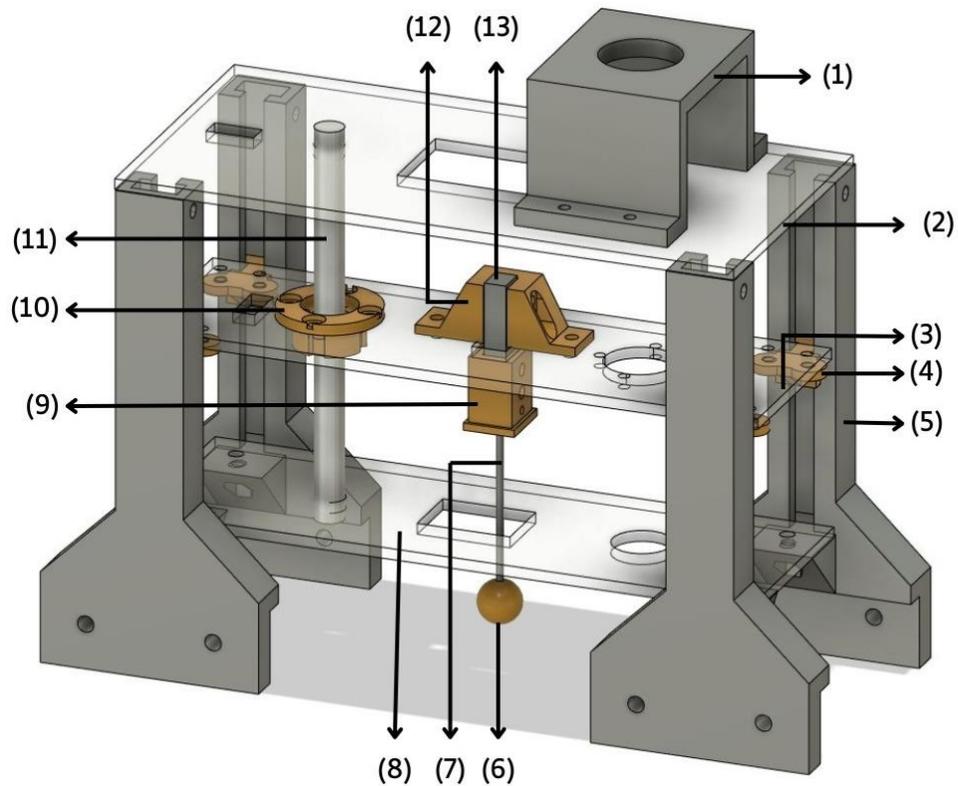


Figura 7: Diseño de sistema de medición de velocidad.

(1): Soporte para motor Stepper NEMA 17.

(2): Base de acrílico superior de 170 x 84 x 3 mm.

(3): Base de acrílico intermedio de 170 x 53 x 5 mm.

(4): Pieza con forma de carril, ubicada en cada pilar para garantizar un desplazamiento equilibrado de la madera intermedia.

(5): Cuatro pilares emperrados a la estructura del canal, encargados de sostener la estructura, otorgar firmeza y proporcionar estabilidad al sistema.

(6): Esfera de 6 mm de radio.

(7): Varilla de aluminio 2 mm que conecta un extremo de la celda de carga con la esfera, la cual experimenta la fuerza de arrastre producida por el flujo.

(8): Base de acrílico inferior de 170 x 55 x 3 mm.

(9): Pieza conectora entre celda de carga y varilla lisa de 2 mm.

(10): En esta pieza se inserta un rodamiento lineal de 8 mm para un suave desplazamiento vertical en la varilla.

(11): Varilla lisa de acero inoxidable de 8 mm de diámetro.

(12): Soporte que sujeta la celda de carga a la base de acrílico intermedio.

(13) Celda de carga.

Un punto relevante en el diseño final fue la elección de la esfera, la cual conforme a su geometría, tiende a generar menos perturbaciones en el flujo, pero aun así, experimenta la fuerza de arrastre. La esfera será acoplada a la celda de carga mediante una varilla lisa de 2 mm y a una pieza fabricada con pla que estará sujeta a la celda de carga. La varilla desempeña la función de transmitir la fuerza de arrastre recibida por la esfera hacia la celda de carga y, a la vez, resguardar su integridad, al evitar la exposición directa del sistema electrónico con el fluido.

5.3 Sistema de adquisición

Para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema de medición, se seleccionaron diferentes componentes electrónicos, considerando su disponibilidad en el mercado nacional. El sistema cuenta con sensores que transmiten la información capturada hacia un Arduino Mega, el cual se encarga de recibir y procesar los datos. En el diseño de este prototipo, se incorporó

una celda de carga de 200 g. Esta celda se deforma ligeramente al recibir la fuerza del flujo, ocasionando un cambio en la resistencia eléctrica. Estas mínimas variaciones de resistencias son identificadas por medio de un circuito (puente de Wheatstone) integrado en la celda de carga, donde en un punto específico del circuito se genera un bajo voltaje de salida que representa las variaciones de resistencias eléctricas. El voltaje de salida es amplificado por el módulo HX-711 para poder ser procesadas por la placa de desarrollo. A través de un código, se relaciona la fuerza aplicada en la celda de carga con el voltaje de salida, lo que permite utilizar la ecuación (4) para obtener la velocidad del flujo, dado que la densidad, el coeficiente de arrastre y el área son variables conocidas.

El sistema también incorpora 3 pulsadores, cada uno destinado a ejecutar una acción específica en el motor Stepper bipolar NEMA 17 por medio de la placa de desarrollo de Arduino. Uno de los pulsadores puede rotar el eje en sentido horario, mientras que otro detiene su movimiento y el último hace rotar el eje en sentido anti-horario. Estas acciones tienen la finalidad de elevar, detener y descender la base de acrílico intermedia, donde se ubica la celda de carga, ya que el eje del motor se encuentra acoplado a una varilla roscada de 8 x 130 mm. Esta varilla posee una tuerca trapezoidal, la cual se encuentra apernada al acrílico intermedio, permitiendo la elevación y descenso controlado de la esfera conforme el usuario lo requiera. Los rangos de elevación y descenso se encuentran delimitados por dos sensores finales de carrera, los cuales al ser accionados mecánicamente, detendrán la acción correspondiente. Cabe destacar que cada una de las acciones mencionadas se pueden visualizar en un display lcd.

La cantidad de componentes utilizados para el sistema de medición fueron los siguientes:

- 1 Arduino Mega.

- 1 Motor Stepper bipolar NEMA 17.
- 1 Módulo A4988.
- 1 Módulo shield para driver A4988.
- 1 Celda de carga de 200 g.
- 1 Módulo HX-711.
- 2 Finales de carrera.
- 3 pulsadores.
- 1 Display lcd de 16 x 2.

A continuación, se describirán cada uno de los componentes electrónicos mencionados anteriormente, de acuerdo a sus especificaciones técnicas, a excepción de la placa de desarrollo de Arduino que posteriormente será discutido.

El Motor Stepper bipolar NEMA 17 es un motor paso a paso, es decir, su eje gira a una cantidad fija de grados. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión de operación: 12 V.
- Corriente máxima: 0,4 A
- Ángulo de desplazamiento: 1,8°/paso.

El módulo A4988 es un controlador o driver, que permite controlar un motor paso a paso bipolar. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión de operación: 3,3 – 5 V.
- Tensión de potencia: 8 – 35 V.
- Corriente máxima: 2 A.

El módulo shield para driver A4988, es un módulo que facilita las conexiones entre el driver A4988 con diferentes controladores.

La Celda de carga de 200 g son transductores que se utilizan para medir fuerza o carga, que comúnmente son utilizadas en balanzas o en dispositivos electrónicos de pesaje. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión de operación: 3 – 12 V.
- Tensión máxima: 15 V.
- Precisión: 0,02% FS.

El módulo HX-711 es un transmisor utilizado en comúnmente para celdas de cargas, esto se debe a que amplifica las mediciones mínimas de voltaje de acuerdo a los cambios en las resistencias implementadas (galgas extensiométricas) en las celdas de cargas. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión de operación: 5 V DC.
- Consumo de corriente: menor a 10 mA.
- Resolución de conversión A/D: 24 bit.
- Frecuencia de lectura: 80 Hz.

Un final de carrera es un sensor electromecánico que detecta la ubicación de un elemento en movimiento mediante un accionamiento mecánico. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión máxima: 250 V
- Corriente máxima: 5A.

Un pulsador permite o interrumpe el paso de la corriente eléctrica de manera momentánea, Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tipo de pulsador: B3F.
- Corriente máxima: 50 mA.

Un display lcd, el cual puede mostrar 16 caracteres por 2 líneas. Sus especificaciones técnicas consisten en:

- Tensión de operación: 5V
- Controlador: SPLC780D1.
- Resolución: 16 x 2.

La adquisición de datos será procesada por el sistema de control, el cual está compuesto por una placa de desarrollo que contiene un circuito integrado programable, componente esencial para respaldar el correcto funcionamiento de los sistemas. Estas placas se caracterizan por sus capacidades de recibir información de los sensores, ejecutar tareas determinadas y alimentar dispositivos del sistema.

Con el fin de seleccionar una placa de desarrollo adecuada para el sistema, se llevó a cabo una tabla comparativa, identificando las siguientes características [22] [23]:

Tabla 1: Comparación de placas de desarrollo Arduino.

Placa de desarrollo	Arduino nano	Arduino Uno	Arduino Leonardo	Arduino Mega
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega328	ATmega32u4	Atmega2560
Entradas analógicas	8	6	12	16
Entradas digitales	14	14	14	54
Puerto USB	Mini B	B	Micro Type B	B/A
Longitud [mm]	44	69	69	102
Ancho [mm]	18	53	53	54
Memoria flash	32	32	32	256

[kB]				
Conector Jack dc	No	Si	Si	Si
Valor [USD]	12 – 32	18 – 29	33 – 50	56 – 79

La placa de desarrollo seleccionada para el sistema de medición fue el Arduino Mega 2056, debido a la gran cantidad de entradas disponibles que lo componen, una amplia memoria flash y la presencia de un conector Jack. En gran parte, la elección de esta placa se fundamentó en la necesidad de obtener más de 14 pines digitales y 3 analógicos, requisito esencial para el funcionamiento completo del sistema.

Adicionalmente, la capacidad de memoria flash del Arduino Mega 2560 debe ser amplia para almacenar de manera eficiente el código necesario para el control de los diferentes elementos que constituyen el sistema.

El incluir un conector Jack es la opción preferida para energizar al sistema por un tema de disponibilidad. Este conector permite alimentar al sistema mediante una batería de 9 V, logrando establecer una fuente de energía autónoma que prescinde la necesidad de contar con un puerto USB como fuente de alimentación. Al contar con este conector no solo favorece la autonomía energética del sistema, sino que también favorece la portabilidad al descartar la dependencia de conexiones fijas, permitiendo su implementación en diferentes entornos.

5.4 Calibración celda de carga

La calibración de una celda de carga se refiere al proceso sistemático y controlado de ajustar y corroborar la precisión de salida de la celda en relación con las cargas aplicadas sobre ella. Durante la calibración, se comparan las lecturas de la celda de carga con valores referenciales conocidos.

En el sistema de medición se implementó una celda de carga de 200 g, la cual contempla una parte fundamental en el sistema, ya que por medio de este sensor se lograron obtener datos a partir del flujo. Para obtener buenos resultados, se decidió calibrar la celda de carga, ya instalada en la base de acrílico intermedia, para replicar las condiciones cuando esté experimentando la fuerza de arrastre del flujo.

Se optó por realizar la calibración en el software de Arduino, en el cual se hicieron los siguientes pasos:

- 1) Se elaboró un código para la calibración.
- 2) Se corroboró que la celda de carga estuviese a 180° en el eje horizontal y con su correcta orientación, es importante que el extremo que no está fijado al acrílico, debe quedar en suspensión para generar deformaciones al instante de añadir algún peso o fuerza sobre la celda de carga.
- 3) Se conectó la celda de carga por medio del módulo Hx-771 a la placa de desarrollo Arduino Mega 2560.
- 4) Se ejecutó el código y se añadió el peso conocido de 13,9 g (ver Anexo 7).
- 5) Finalmente, se abrió el monitor Serial de Arduino, se calculó un promedio de 30 muestras y se dividió entre el valor efectivo, donde se da por terminada la calibración y así, realizar mediciones en gramos.

Para una mayor compresión, la figura 8 muestra la manera en que se calibró la celda de carga. Donde la base de acrílico fue fijada a una madera lisa mediante una prensa. posterior a ello, se apernó la pieza 9 de la figura 7 en la celda de carga y se colgó una moneda de 50 pesos a la varilla de 2 mm para ejercer una deformación en la celda de carga, lo cual ocasiona una variación interna de voltaje que relacionada con la fuerza aplicada.

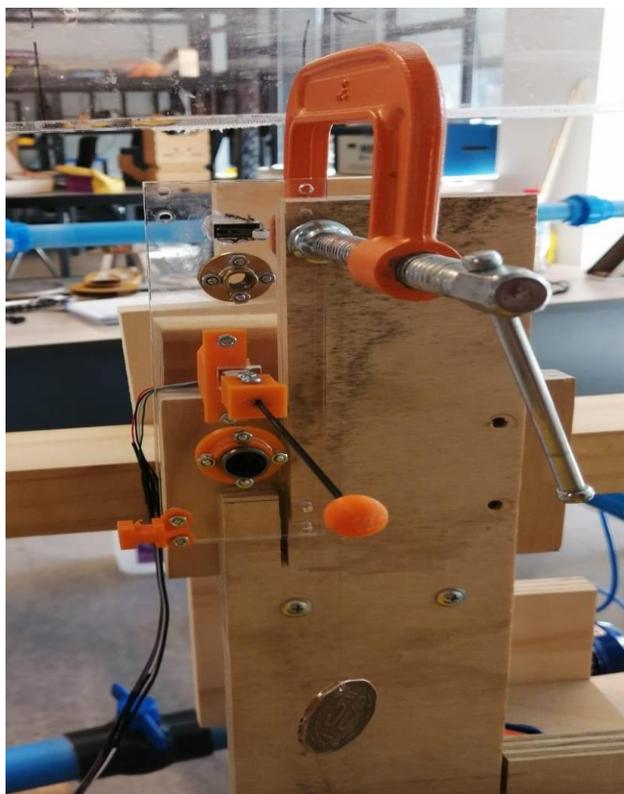


Figura 8: calibración celda de carga.

5.5 Construcción del sistema de medición de velocidad

La construcción del sistema de medición se llevó a cabo en un espacio designado de la Fábrica Digital O'Higgins, equipada con una amplia gama de materiales, herramientas especializadas y máquinas tecnológicas que sirvieron para facilitar el proceso de construcción. En este contexto, se utilizó la cortadora láser EPILOG MINI 24, la cual es una máquina de alta precisión que mediante un rayo láser, es capaz de grabar y cortar con alta precisión en dos dimensiones. Esta máquina presenta un área de trabajo de 305 x 610 mm, un grosor máximo de material de 5,5 mm y recibe archivos en formato SVG. Particularmente, en la fábrica digital se dispone del programa Inkscape, el cual es un software gratuito de código abierto que permite diseñar y editar trabajos vectoriales.

Por otra parte, también se utilizó la impresora 3D modelo Artillery Hornet, que emplea la tecnología de adición de capas secuenciales con estilo cartesiano. Esta impresora puede generar objetos a partir de diseños digitales elaborados en softwares de diseño o recreados por un scanner 3D. Cuenta con una cama caliente programable hasta 80 °C para obtener una mejor adherencia de los objetos, además posee un área de trabajo de 220 x 220 x 250 mm y acepta archivos en formato STL.

Ambas máquinas emplearon archivos provenientes de Fusion 360, ya que la particularidad del programa es que los archivos se pueden establecer en formato STL y también tiene un enlace con Inkscape para su operación en la cortadora láser.

Finalmente, luego de obtener todas las piezas requeridas se realizó el proceso de ensamblado, que dio como resultado en un sistema de medición de velocidad para canales abiertos. El cual se muestra en la figura 9.

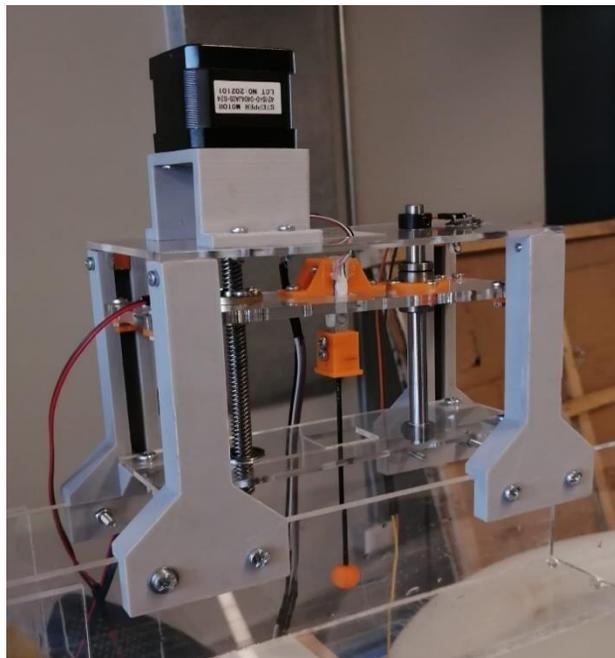


Figura 9: Sistema de medición de velocidad para canales abiertos.

5.6 Resultados experimentales

Una vez corroborada la integridad tanto del aparato experimental como del sistema de medición, se dio inicio al procedimiento operativo del sistema de pruebas, el cual consistió en abrir las llaves de paso para permitir que el flujo de agua pase a través del caudalímetro de 2". Posteriormente, se activó el variador para alimentar la bomba de agua, la cual extrae agua del tanque y la conduce al canal, retornando nuevamente al tanque.

Apenas el flujo comenzó a circular por canal, se cargó el sketch en la placa de desarrollo Arduino Mega 2560, para proceder al descenso controlado mediante el pulsador correspondiente, asegurándose que el centro de la esfera quedase a 9 mm de la base del canal, que fue la altura mínima a la que se midió.

Se tomaron muestras a 3 diferentes ángulos de inclinación del canal (1,5°, 3° y 4,5°). Para cada ángulo, se establecieron dos velocidades de flujo que fueron regulados mediante el variador de frecuencia (30 y 40 Hz), y a cada velocidad se tomaron muestras a diferentes alturas, estableciendo que la altura mínima de medición desde la base del canal hacia el centro de la esfera es de 9 mm. También se determinó que la esfera nunca debe traspasar la altura superficial del flujo, por lo tanto, se estableció que desde el centro de la esfera hacia la superficie debe existir una altura de 9 mm. Estas condiciones se establecieron con el fin de evitar mediciones erróneas.

La fuerza de arrastre es transmitida a la celda de carga, ocasionando una deformación en las galgas extensiométricas. Las mediciones son procesadas por Arduino, con una frecuencia de muestreo mediante el promedio simple de 20 muestras cada 5 segundos y proceso la información según lo establecido en el sketch, obteniendo la velocidad del flujo a diferentes alturas.

Para las siguientes imágenes se debe tener en claro que cada punto de las oscilaciones corresponde al promedio de una medición a una altura determinada y se establecen en porcentajes para adimensional las alturas, con el fin de comparar los resultados obtenidos. La altura máxima alcanzada corresponde a la velocidad superficial, la cual fue obtenida a partir del método del flotador.

En la figura 10, se muestra el perfil de velocidad obtenido con un ángulo de inclinación de 1,5°. Con una frecuencia de 30 Hz se lograron realizar 3 mediciones con el sistema de medición. Mientras que a 40 Hz, fueron 4 mediciones.

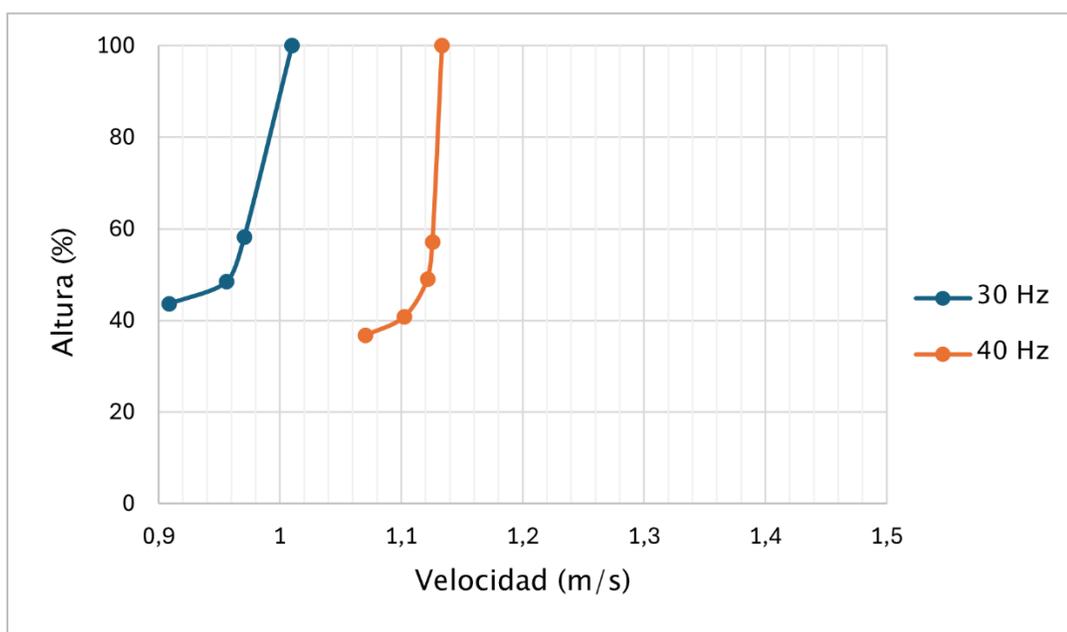


Figura 10: perfil de velocidad con ángulo de inclinación de 1,5°.

De la figura 10 se puede apreciar que la altura fue en aumento, al tener una mayor cantidad de mediciones en los 40 Hz. Por otra parte, las mediciones de velocidad obtenidas a 30 Hz y 40 Hz fueron levemente más lentas que la velocidad superficial y se asemejan al perfil de velocidad que espera en cada medición (ver figura 2).

La siguiente figura muestra los perfiles de velocidades obtenidos con una inclinación de 3° , donde realizó una menor cantidad de muestras en comparación a las realizadas en la figura 10 pero hubo un aumento en la velocidad de cada oscilación.

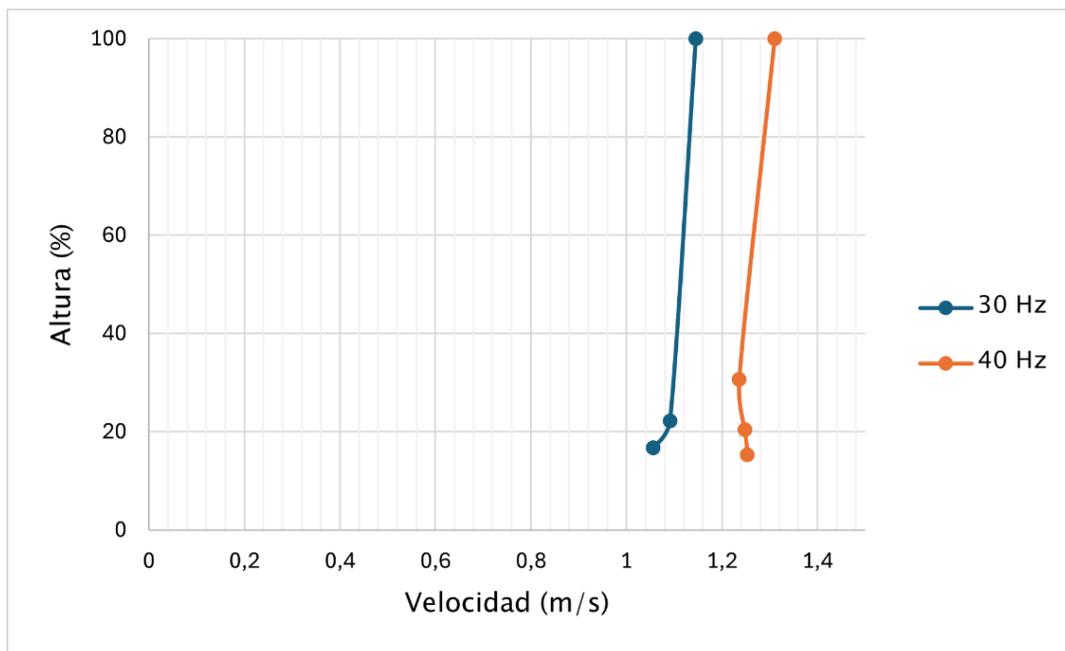


Figura 11: Perfil de velocidad con ángulo de inclinación de 3° .

En la Figura 11, se logra ver que la curva de la oscilación a 30 Hz tiene una forma parecida a los perfiles de velocidad. Mientras que en la curva de 40 Hz presentó una velocidad estable en los dos puntos cercanos a la base del canal, pero luego ocurrió una disminución en su velocidad. Sin embargo, en ningún instante la velocidad fue mayor a la velocidad superficial.

Por último, la siguiente figura muestra las mediciones a diferentes alturas a $4,5^\circ$ de inclinación del canal. Al igual que en las mediciones anteriores, la velocidad de cada medición fue en aumento y disminuyó la altura del flujo.

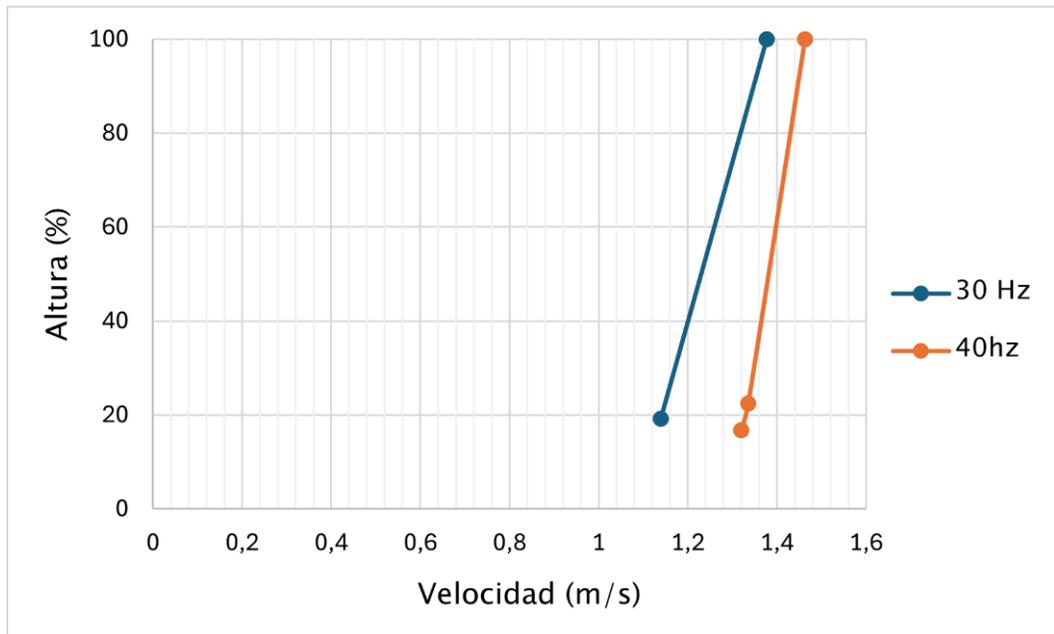


Figura 12: Perfil de velocidad con ángulo de inclinación de 4,5°.

En la Figura 12, no se puede determinar las mediciones como perfil de velocidad, ya que solo se obtuvo una medición a 30 Hz y dos mediciones a 40 Hz. Sin embargo, las mediciones muestran una velocidad menor que la velocidad superficial y se observa que a medida que se aumenta la frecuencia, también aumenta la velocidad en las mediciones.

5.7 Validación de datos

La validación de datos se llevó a cabo mediante 2 métodos de mediciones prácticas – teóricas. La primera consistió en tomar el tiempo que se demoran 20 litros de agua al pasar por el caudalímetro de 2". Al terminar con esta toma de muestras, se procedió a capturar diferentes imágenes al nivel del flujo, procurando que la esfera del sistema de medición no se encuentre inmerso en el flujo. Al obtener estos datos de manera práctica se procedió a utilizar la ecuación (2) y (3) para calcular la velocidad media del canal.

Se seleccionaron los datos obtenidos con un ángulo de inclinación del canal de 4,5°, al tener una menor cantidad de muestras a diferentes alturas del canal.

Tabla 2: Datos para obtener la velocidad media del flujo con una inclinación de 4,5°.

Frecuencia (Hz)	Tiempo caudalímetro (s)	Litros (L)	Caudal (m ³ /s)	Altura de flujo (mm)	Velocidad media (m/s)
30	18,6525	20	0,00107	1,5642	1,18
40	13,994	20	0,00142	1,7875	1,37864

Por otro lado, se calculó la velocidad superficial con el método del flotador. Este método consistió en determinar dos puntos a un metro de distancia uno del otro y utilizar un objeto que flote, en este caso, un trozo de madera de 0,5 cm³. El procedimiento consiste en tomar el tiempo que tarda el objeto en cruzar desde un punto al otro, desplazándose a través del flujo. Luego de realizar 10 muestras, el promedio de los resultados obtenidos para la velocidad superficial a 30 Hz fue de 1,377 m/s y a frecuencia de 40 Hz fue de 1,4634 m/s, los cuales fueron utilizados para las figuras 14 y 15 respectivamente.

Para las siguientes imágenes se debe considerar que la frecuencia de adquisición de datos fue cada 5 segundos en un lapso de 100 segundos. Por otra parte, fueron definidas las variables de la velocidad superficial como " V_{sup} " y la velocidad media como " V_m ".

En la siguiente figura se puede visualizar la medición realizada por el sistema de medición a 9 mm de altura y a 30 Hz. Donde se muestra la constante de velocidad superficial y media, obtenidas a partir de los métodos prácticos – teóricos.

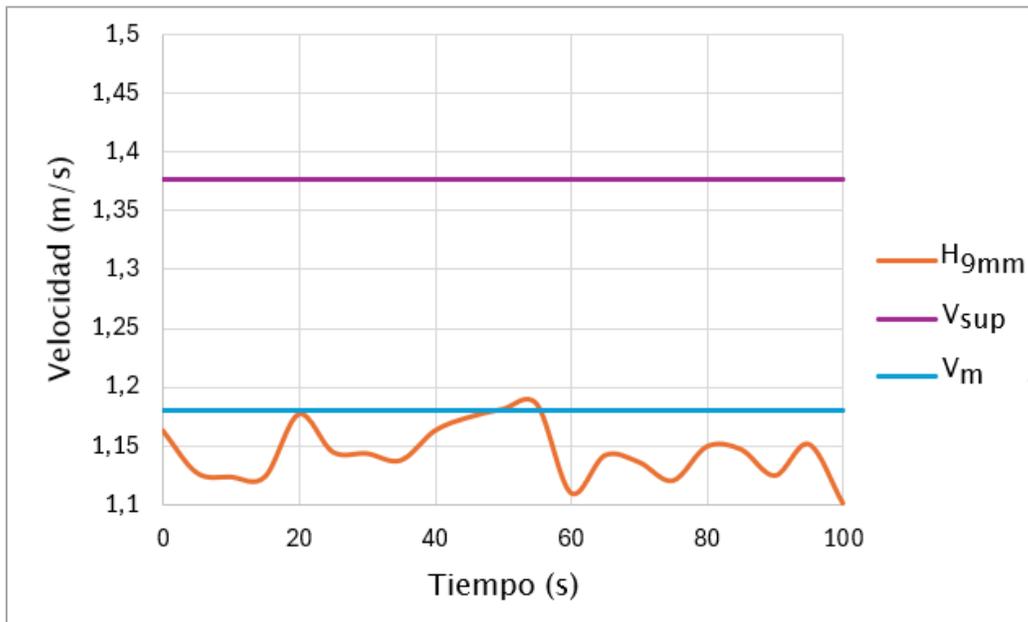


Figura 13: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 30 Hz y ángulo de inclinación $4,5^\circ$.

En la Figura 13, se puede ver que la velocidad medida por el sistema de velocidad es estable a través del tiempo, también posee una menor velocidad que la velocidad superficial y cercana a la velocidad media.

La siguiente figura presenta la medición de velocidad a 40 Hz, donde la altura del flujo en el canal aumentó, logrando medir a 9 y 10 mm.

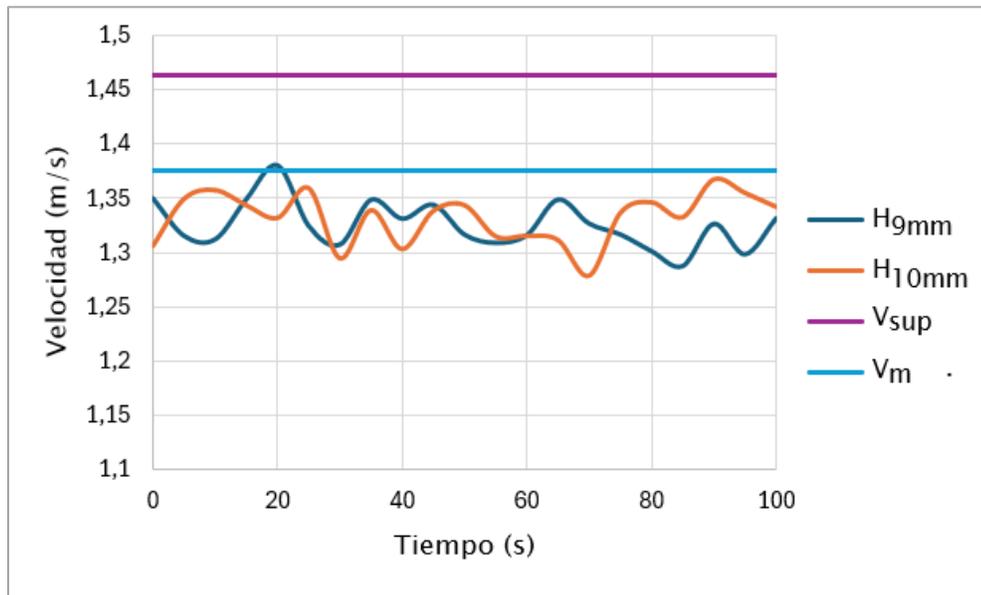


Figura 14: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 40 Hz y ángulo de inclinación 4,5°.

Al igual que en la figura 13, ambas mediciones se ven estables a través del tiempo, con diferentes oscilaciones que pueden ser producto de turbulencias en el flujo, vibraciones indeseadas u otras variables. Nuevamente la velocidad de las oscilaciones es menor a la velocidad superficial y cercana a la velocidad media.

En las siguientes figuras se realizó el mismo procedimiento que en la parte anterior, donde se puede apreciar el comportamiento de cada medición de velocidad a través del tiempo, teniendo en cuenta las mediciones de la velocidad superior y media con ángulos de inclinación de 3° y 1,5°, a una frecuencia de 30 y 40 Hz con sus respectivas mediciones a diferentes alturas del canal.

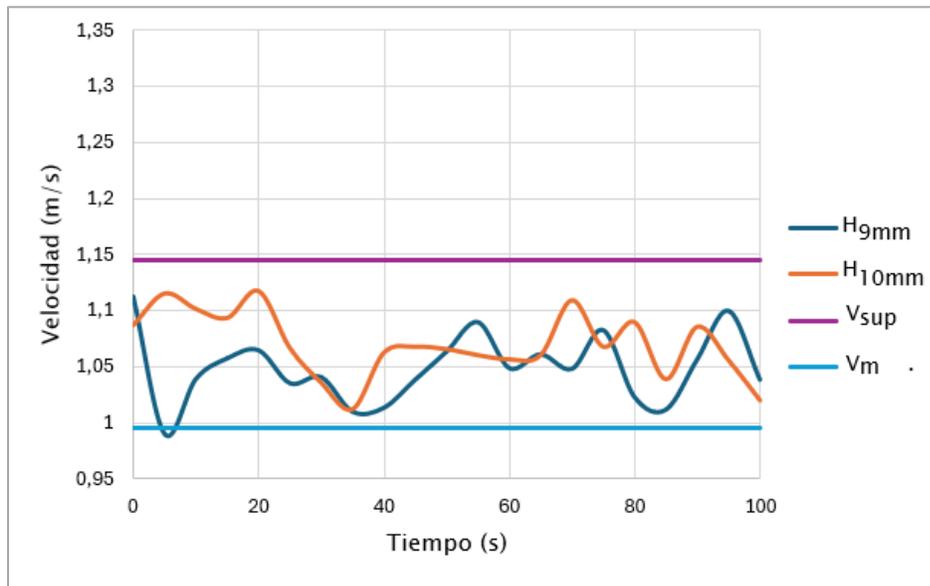


Figura 15: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 30 Hz y ángulo de inclinación 3°.

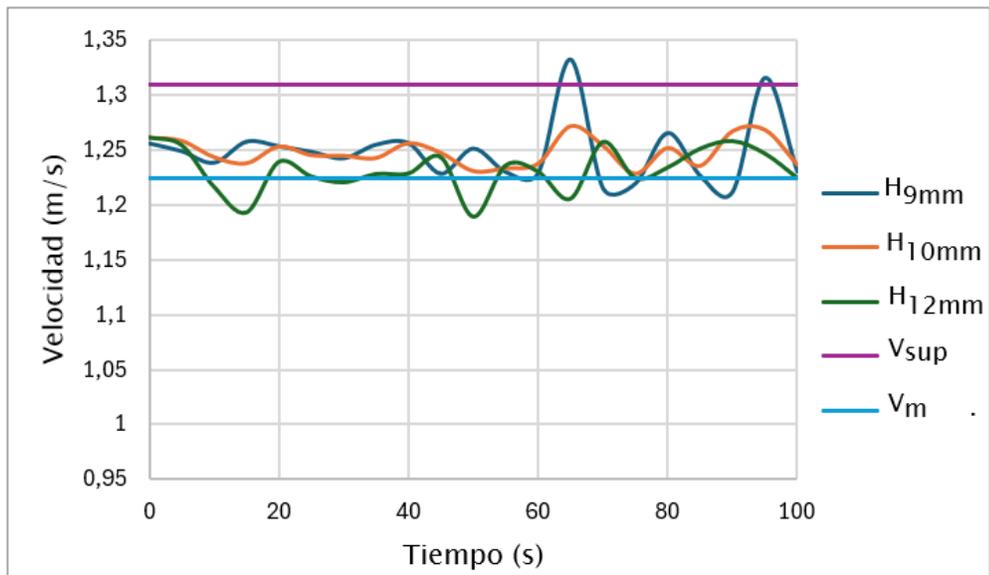


Figura 16: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 40 Hz y ángulo de inclinación 3°.

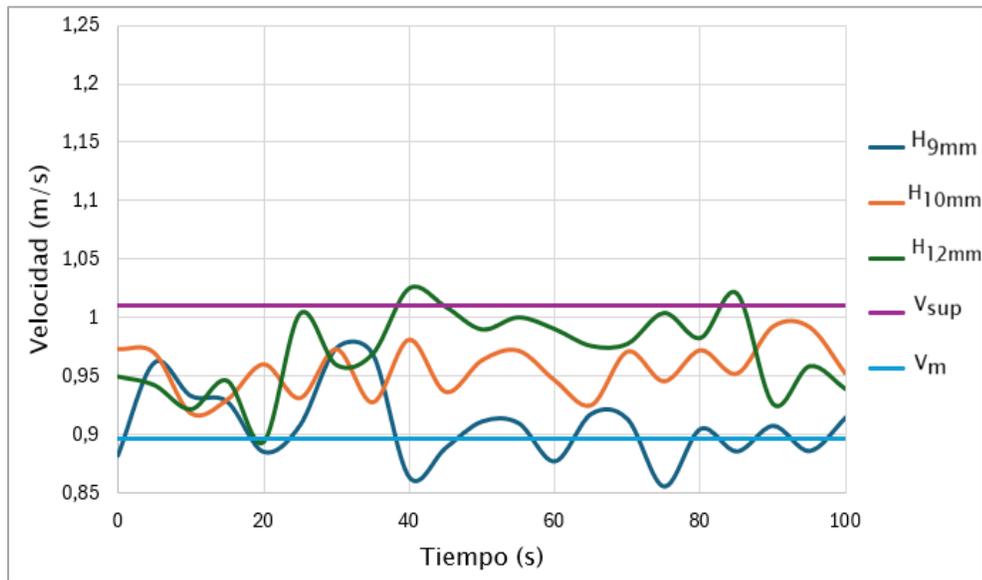


Figura 17: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 30 Hz y ángulo de inclinación 1,5°.

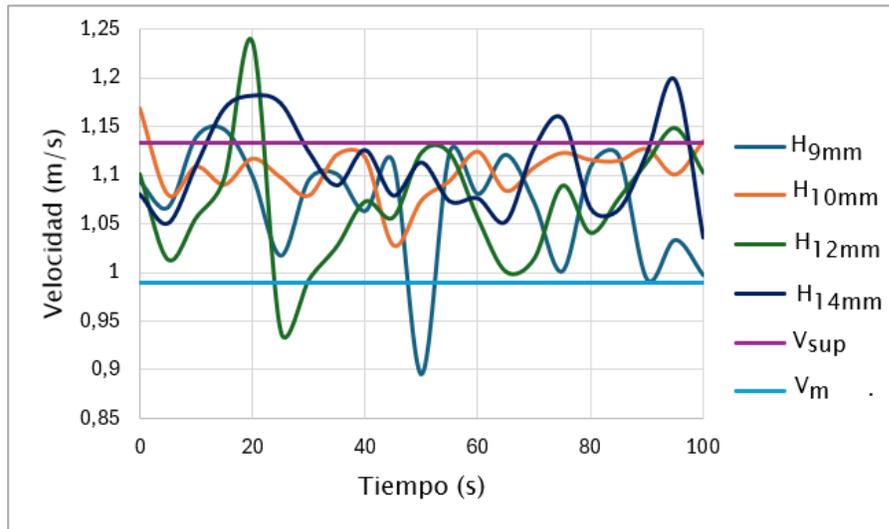


Figura 18: Mediciones de velocidad a través del tiempo con una frecuencia de 40 Hz y ángulo de inclinación 1,5°.

De acuerdo a las figuras anteriores se puede mencionar que su comportamiento es estable, a pesar que en algunos casos se pueden identificar velocidades irregulares que luego siguen el curso normal de la oscilación. También se puede apreciar que mientras mayor es el ángulo de inclinación y frecuencia, las velocidades realizadas por el sistema de medición se aproximan a la velocidad media y son menores a la velocidad superficial, lo cual es algo coherente.

Conclusión

A modo de conclusión, el objetivo principal de este proyecto fue desarrollar un sistema de medición de velocidad para flujos de agua en canales abiertos utilizando una celda de carga. El cual fue llevado a cabo, de acuerdo con los requerimientos de robustez, facilidad de montaje y desmontaje, permitiendo un transporte sin complicaciones y demostrando una buena resistencia ante la fuerza del flujo. El sistema cumplió con cada requerimiento propuesto y además, no obtuvo una medición de velocidad sino que se logró construir el perfil de velocidad en la mayor parte de las mediciones realizada por el sistema.

Las gráficas del perfil de velocidad demostraron que las mediciones obtenidas eran consistentes de acuerdo a los perfiles de velocidad en canales abiertos y además, a medida que se aumentaba la frecuencia en el variador las mediciones demostraron que también aumentaba la velocidad del flujo pero siempre la velocidad era menor a la velocidad superficial, lo cual es algo coherente.

En relación a la validación de datos, las mediciones obtenidas se mantuvieron cercanas a la velocidad media y a una distancia prudente de la velocidad superficial, lo cual está bien. La velocidad a través del tiempo fue relativamente estable con la presencia de algunos peaks indeseados pero que son parte de la turbulencia del flujo.

La comparación entre las mediciones prácticas – teóricas con las realizadas por el sistema de medición, demostraron una concordancia aceptable, la cual aún puede mejorar ajustando parámetros de calibración, modificando piezas o considerando más variables que puedan afectar a la medición.

Finalmente, considerando que esta es la etapa inicial del proyecto, es importante considerar que los resultados fueron consistentes y la naturaleza innovadora del dispositivo ofrece una base sólida para un posterior desarrollo. Este enfoque no solo tiene potenciales

beneficios en aplicaciones agrícolas, sino que también se puede expandir a diversas áreas de la ingeniería, promoviendo el diseño y su instalación para contribuir en avances tecnológicos para el país, por lo que se recomienda realizar investigaciones adicionales para abordar posibles fuentes de error y lograr aumentar la precisión del sistema de medición.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro, considerando los mismos alcances del proyecto, es posible reducir el tamaño de la esfera que se encuentra expuesta ante la fuerza del flujo, con el fin de aumentar la cantidad de mediciones utilizando los mismos niveles del flujo. Con esto se podría construir el perfil de velocidad deseado.

Por otra parte, también es importante considerara extender el canal de acrílico para disminuir la turbulencia, ya que con un flujo más estable podrían eliminar algunos peaks indeseados que surgieron en las mediciones.

Por último, implementar un almacenamiento externo de datos sería muy beneficioso. Esto permitiría almacenar mediciones para su posterior análisis o para su uso en aplicaciones a largo plazo. para almacenar las mediciones y ser manipuladas para diferentes beneficios. Es posible agregar un módulo para tarjetas de memoria microSD que se pueda conectar al Arduino Mega para almacenar los datos de manera eficiente y accesible.

Referencias

- [1] K. Vairavamoorthy, S. D. Gorantiwar, y A. Pathirana, «Managing urban water supplies in developing countries – Climate change and water scarcity scenarios», *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 33, n.º 5, pp. 330–339, ene. 2008, doi: 10.1016/j.pce.2008.02.008.
- [2] «ONU–Habitat – Comprender las dimensiones del problema del agua». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>
- [3] «fao.org/aquastat/es/overview/methodology/water-use/index.html». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/aquastat/es/overview/methodology/water-use>
- [4] D. G. de Aguas, «Chileatiende – Derecho de aprovechamiento de aguas superficiales». Accedido: 26 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/7109-derecho-de-aprovechamiento-de-aguas-superficiales>
- [5] V. Weitbrecht, G. Kühn, y G. H. Jirka, «Large scale PIV–measurements at the surface of shallow water flows», *Flow Meas. Instrum.*, vol. 13, n.º 5, pp. 237–245, dic. 2002, doi: 10.1016/S0955–5986(02)00059–6.
- [6] «MEDIDOR CAUDAL DE MOLINETE GLOBAL WATER», Simtech. Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://simtech.cl/areas-de-negocios/division-instrumentacion/medidor-caudal-de-molinete-global-water/>
- [7] Z. Xu *et al.*, «Towards high resolution monitoring of water flow velocity using flat flexible thin mm–sized resistance–typed sensor film (MRSF)», *Water Res. X*, vol. 4, p. 100028, ago. 2019, doi: 10.1016/j.wroa.2019.100028.
- [8] «bajar.pdf». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/ME33A/1/material_docente/bajar?id=138200
- [9] W. Yang, I. Delbende, Y. Fraigneau, y L. Martin Witkowski, «Large axisymmetric surface deformation and dewetting in the flow above a rotating disk in a cylindrical tank: Spin–up and permanent regimes», *Phys. Rev. Fluids*, vol. 5, n.º 4, p. 044801, abr. 2020, doi: 10.1103/PhysRevFluids.5.044801.
- [10] G. M. L. Prado, «Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones Yunus Cengel y John Cimbala Primera Edición», Accedido: 27 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/25669790/Mecanica_de_Fluidos_Fundamentos_y_Aplicaciones_Yunus_Cengel_y_John_Cimbala_Primer_Edicion

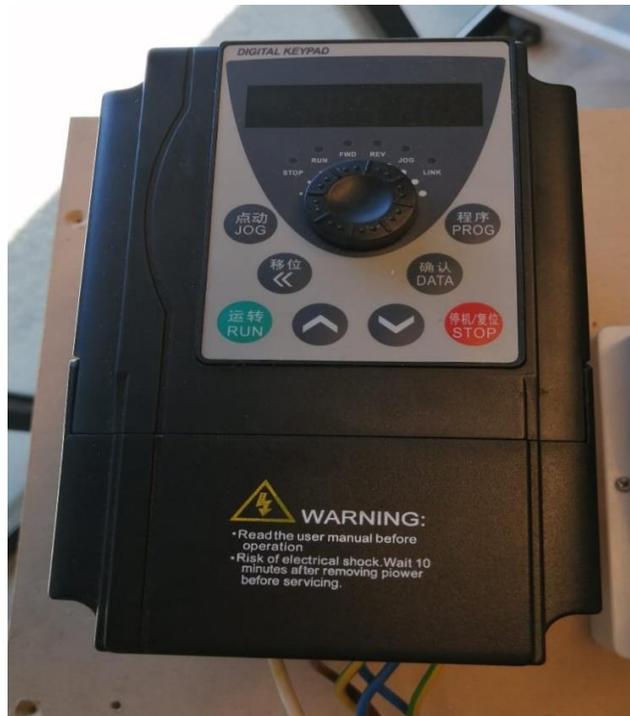
- [11] «(a) Flujo laminar en capas y b) flujo turbulento con vórtices y mezcla. | Descargar Diagrama Científico». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-a-Flujo-laminar-en-capas-y-b-flujo-turbulento-con-vortices-y-mezcla_fig3_320034025
- [12] «(PDF) Mecánica de Fluidos, Cengel, Ed. 1», dokumen.tips. Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dokumen.tips/engineering/mecanica-de-fluidos-cengel-ed-1.html>
- [13] «Displacement Boundary Condition – an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/displacement-boundary-condition>
- [14] D. H. Ngoma y Y. Wang, «Hhaynu micro hydropower scheme: Mbulu – Tanzania comparative river flow velocity and discharge measurement methods», *Flow Meas. Instrum.*, vol. 62, pp. 135–142, ago. 2018, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.05.007.
- [15] «What is volume flow rate? (article) | Fluids», Khan Academy. Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>
- [16] «8.6: Fuerzas de arrastre en fluidos», LibreTexts Español. Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Fisica/Mec%C3%A1nica_Cl%C3%A1sica/Mec%C3%A1nica_Cl%C3%A1sica_\(Dourmashkin\)/08%3A_Aplicaciones_de_la_Segunda_Ley_de_Newton/8.06%3A_Fuerzas_de_arrastre_en_fluidos](https://espanol.libretexts.org/Fisica/Mec%C3%A1nica_Cl%C3%A1sica/Mec%C3%A1nica_Cl%C3%A1sica_(Dourmashkin)/08%3A_Aplicaciones_de_la_Segunda_Ley_de_Newton/8.06%3A_Fuerzas_de_arrastre_en_fluidos)
- [17] W. Sears y D. Telionis, «Boundary–Layer Separation in Unsteady Flow», *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 28, n.º 1, pp. 215–235, ene. 1975, doi: 10.1137/0128018.
- [18] G. R. Higson, «Recent advances in strain gauges», *J. Sci. Instrum.*, vol. 41, n.º 7, p. 405, jul. 1964, doi: 10.1088/0950-7671/41/7/301.
- [19] «Galga extensométrica de metal: descripción general | Temas ScienceDirect». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/metal-strain-gauge>

- [20]H. Tioli y A. Navas, «Diseño y construcción de celdas de carga para comprobaciones intermedias de máquinas de fuerza», *Ing. Rev. Univ. Costa Rica*, vol. 22, n.º 1, pp. 57-68, 2012.
- [21]«ELEVADOR 4 COLUMNAS 4.5 TON AMERICA», Victor Morales. Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.victormorales.cl/elevadores-de-autos/elevador-4-columnas-45-ton-america-499.html>
- [22]«Comparación de las placas Arduino con recomendaciones de Solectroshop». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://solectroshop.com/es/blog/comparacion-de-placas-arduino-con-recomendaciones-de-solectroshop-n5>
- [23]«Arduino Boards Comparison», Spiceman. Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://spiceman.net/arduino-edition/>
- [24]«densidadtemperatura_agua_tabla.pdf». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ugr.es/~elenasb/teaching/densidadtemperatura_agua_tabla.pdf

Anexos

Anexo 1: Características y figura del variador de frecuencia utilizado.

Variador de frecuencia AE200H-2-1HP-2. 2G				
alimentación	HP	Corriente (A)	Tensión (V)	Frecuencia (Hz)
INPUT	1	2	220	50 / 60
OUTPUT	3	10	380 - 400	0 - 600



Anexo 2: características de la bomba de agua.

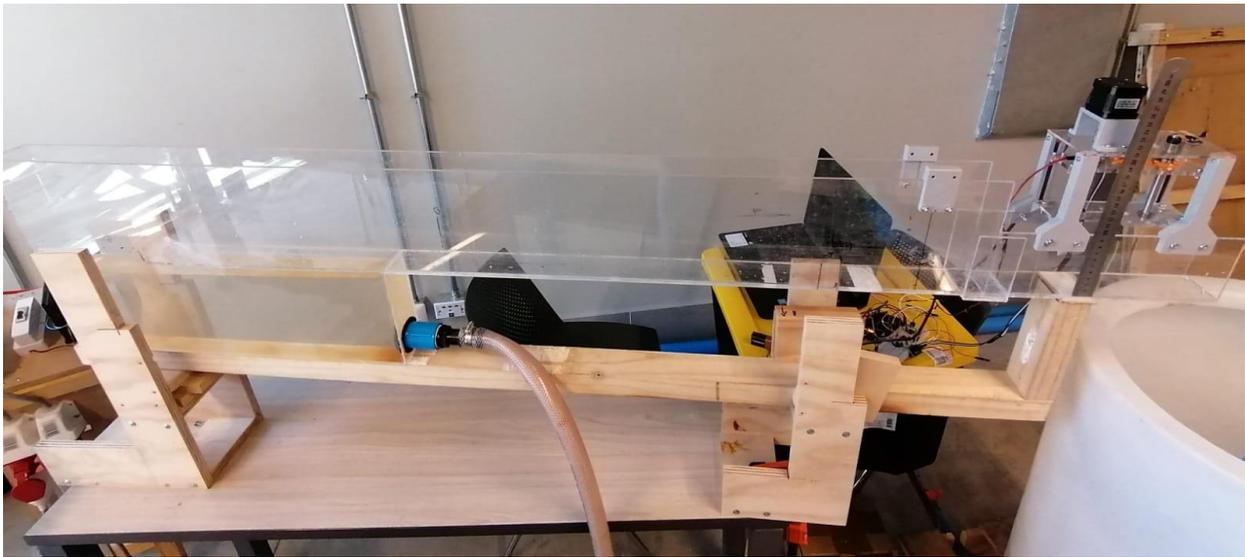
- Modelo: SCF1 100 T
- Tensión: 230 / 400 V
- Frecuencia: 50 Hz
- Revoluciones por minuto: 2850 r.p.m.
- Corriente: 3,8 / 2,2 A



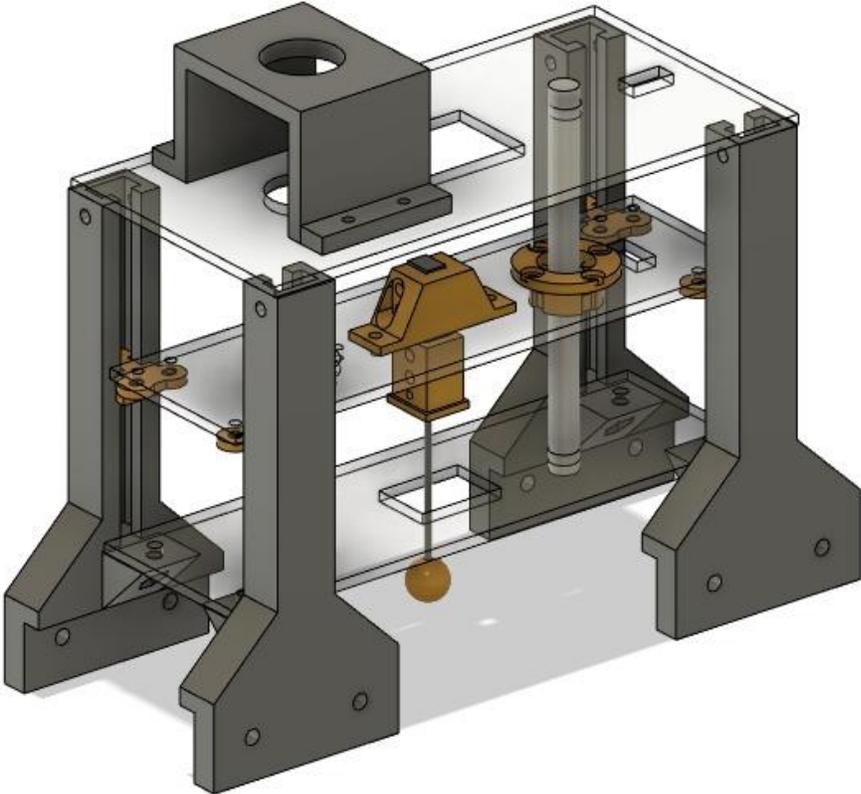
Anexo 4: Características del canal de pruebas.

- Material: acrílico 0,6 cm.
- Dimensiones: 174 x 5,8 x 35 cm.
- Altura estanque inferior: 18 cm.

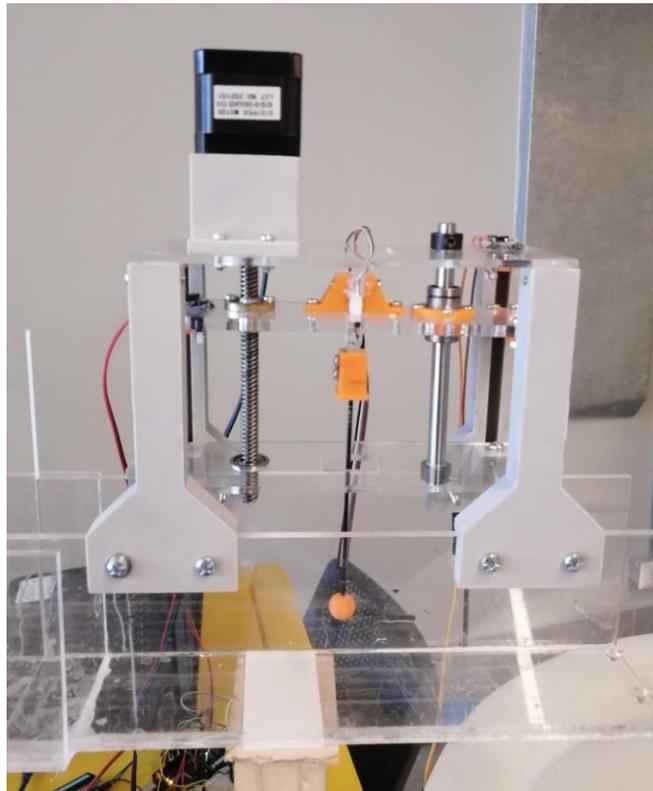
Los últimos 30 cm de canal la altura disminuye a 9,5 cm para la instalación del prototipo.



Anexo 5: Diseño del sistema de velocidad de fluidos implementado en canal de pruebas



Anexo 6: Prototipo instalado en canal de pruebas.



Anexo 7: Peso de elementos para calibración.



Se debe tomar en cuenta que en la figura 10 se instalan 2 pernos que aumentarían el peso en la celda de carga. Por el ángulo de la imagen no se logran apreciar pero si están considerados en los 13,9 g.