Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Sr. Álvaro Suazo Schwencke Profesor Guía: Sr. Luis Santana Oyarzo Profesor Comisión: Sr. Alexander Opazo Vega

"CALIBRACIÓN DE SENSORES DE FUERZA INMERSOS EN AGUA EN UN CANAL DE LABORATORIO"

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil.

RODRIGO ANDRÉS SEPÚLVEDA CHAMBLAS

CONCEPCION, Diciembre 2013.

DEDICATORIA

A Dios, a mi querido "Tata", a mis padres Patricio y María Eugenia, a mi hermana Paulina y a mi hijo Mateo Vicente, por todo su cariño, comprensión y apoyo incondicional, les dedico y entrego el fruto de mi esfuerzo.

Gracias por confiar en mí y alentarme a conseguir mi primera gran meta.

Rodrigo Andrés

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío, por facilitarme las instalaciones de su Laboratorio para poder realizar mí proyecto de título.

A mi Profesor Guía, Sr. Luis Santana Oyarzo, por su gran apoyo, ayuda y paciencia durante todo el trabajo realizado y sobre todo por confiar en mí.

A todos mis parientes y amigos que, de una u otra forma, fueron participes de este gran logro.

NOMENCLATURA.

Unidades de Medidas:

$\Delta Vs (mV$) : Variación Voltaje de Salida del instrumento.
V _{ref}	: Voltaje de referencia del equipo en desarrollo.
$\Delta R \left(\Omega \right)$: Resistividad eléctrica
<i>Ro</i> (Ω)	: Resistividad inicial del Strain Gage
Vab(mV): Voltaje obtenido con el PW.
Vref	: Voltaje de referencia del circuito electrónico.
AI	: Amplificador de instrumentación
y(z)	: Es el desplazamiento lateral del sensor.
Z	: Es la escala de posición desde el empotramiento (0, L).
L	: Es la longitud del sensor en voladizo.
Pd	: Es la presión dinámica ejercida sobre el sensor (N/m ²).
Pe	: Presión estática ejercida sobre el sensor (N/m ²).
Ε	: Módulo de elasticidad
Iz	: Momento de Inercia del sensor.
EIz	: Producto entre E y Iz del sensor.
P/Pcr	: Presión normalizada
y(L/2)/L/	2: Deformacion lateral normalizada en el centreo de presiones.
Pcr	: Presión crítica
α	: Parámetro que depende del sistema de adquisición de señal.
u² (m/s)	: Cuadrado de la Velocidad del flujo.
SF1	: Sensor de Fuerza N° 1.
SF2	: Sensor de Fuerza N° 2.
SF3	: Sensor de Fuerza N° 3.
SF4	: Sensor de Fuerza N° 4.
SF5	: Sensor de Fuerza N° 5.
SF6	: Sensor de Fuerza N° 6.
Ti	: Tiempo inicial de desplazamiento del carro.
Tf	: Tiempo final de desplazamiento del carro.
Tm	: Tiempo medido de desplazamiento del carro en la zona de medición.
Tmi	: Tiempo medido inicial en la zona de medición.

- **Tmf** : El tiempo medido final en la zona de medición.
- **NVs** : Es el número de datos entre Tmi y Tmf.
- La : Zona de aceleración
- **Lm** : Zona de medición.
- Lf : Zona de frenado.
- **VC** : Velocidad crítica.
- **u** (**m**/**s**) : Velocidad del carro.
- **Lm** : Es el largo de la zona de medición
- **Tm** : Es el tiempo medido en segundos.
- h : Altura de Carga
- **E :** Error relativo del tiempo medido
- εL : Error Relativo de distancia recorrida
- εI : Error relativo de la señal instrumental
- T (°C) : Datos de temperatura ambiente
- (Vs) : Voltaje de Salida.
- (Vso) : Voltaje de Salida Inicial.
- (**Vp**) : Voltaje de Salida
- (Vc) : Voltaje de Salida

INDICE GENERAL.

	Pág.
INDICE GENERAL	vi.
INDICE DE FIGURAS	viii.
INDICE DE TABLAS	ix.
RESUMEN	1.
ABSTRACT	2.
1. INTRODUCCIÓN	3.
1.1. Descripción del Problema	3.
1.2. Base Teórica	4.
1.3. Objetivos	4.
1.3.1. Hipótesis	4.
1.3.2. Objetivo General	4.
1.3.3. Objetivos Específicos	4.
2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	5.
2.1. Protocolo de Ensayo para Corridas Experimentales	7.
3. PROPUESTA DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN	9.
3.1. Dimensiones del Canal de Calibración adoptado	9.
3.1.1. Longitud del Canal	9.
3.1.2. Profundidad del Canal	9.
3.2. Sistema de Desplazamiento para el Sensor	10.
3.2.1. Características del Carro	10.
3.2.2. Dispositivo Rotacional	10.
3.3. Sistema de Registro de Información	11.
3.4. Otros Requerimientos	12.
3.5. Calidad de la Señal	12.
3.5.1. Incertidumbres de la Medición del Canal Propuesto	12.
3.5.2. Ruido Instrumental	13.

Páσ	
rag.	

	0
4. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN	16.
4.1. Características y Registros de los Ensayos Experimentales	16.
4.2. Resguardos Específicos para cada Corrida Experimental	16.
4.3. Adquisición de Datos	17.
4.4. Obtención del ΔVs y u	17.
5. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	19.
5.1. Metodología	19.
5.2. Resultados de Significancia de los Parámetros	19.
5.3. Curvas de Calibración Propuestas para cada Sensor	20.
5.3.1. Propuesta de Modelo para los Sensores que no se rechaza la Hipótesis	20.
5.3.2. Propuesta de Modelo para los Sensores que se rechaza la Hipótesis	22.
5.4. Efecto de la Energía Potencial para el Sensor SF4 a distintas Alturas	
de Carga	23.
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26.
6.1. Conclusiones	26.
6.2. Recomendaciones	26.
	20
BIBLIOGRAFIA	20.
ANEXOS	29.
Anexo A: Antecedentes teóricos que relacionan la presión que ejerce el fluido	
sobre el sensor y la deformación lateral del sensor	30.
Anexo B: Datos Experimentales del Ruido Instrumental antes	
de comenzar y durante los Ensayos Experimentales	33.
Anexo C: Datos Experimentales del Efecto del Tiempo sobre	
el Ruido Instrumental	35.
Anexo D: Datos Experimentales para obtener ΔVs para los	
seis sensores a una altura de carga de 10 cm	38.
Anexo E: Curvas de Calibración para los Sensores malos	42.
Anexo F: Datos Experimentales para obtener ΔVs para el	
sensor SF4 a siete alturas de carga distintas.	43.

INDICE DE FIGURAS.

		Pág.
Figura 1.	Esquema de equipos y materiales empleados en las corridas	
	experimentales	6.
Figura 2.	Fotografía canal hidráulico del laboratorio	6.
Figura 3.	Desviación estándar de la señal instrumental para el sensor	
	SF4 antes de comenzar el ensayo experimental (flujo en reposo)	
	para el sentido positivo(izquierda)	
	y negativo (derecha) del sensor	14.
Figura 4.	Desviación estándar de la señal instrumental durante la	
	realización del ensayo experimental para el sentido positivo(izquierda)	
	y negativo (derecha) del sensor	15.
Figura 5.	Esquema de los parámetros para obtener ΔVs	17.
Figura 6.	Variación de voltaje de salida y el cuadrado de la velocidad	
	del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF5	21.
Figura 7.	Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor,	
	para ambos sentidos juntos del sensor SF3	21.
Figura 8.	Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor,	
	para ambos sentidos juntos de los sensores SF1 y SF4	23.
Figura 9.	Coeficientes de determinación para β y γ dependerán de	
	la carga hidráulica, para la curva de calibración $\Delta Vs=\beta^*u + \gamma$	25.

INDICE DE TABLAS.

		Pág.
Tabla 1.	Significancia de los Parámetros:	20.
Tabla 2.	Resumen de Regresión Lineal del Sensor SF4 a Diferentes	
	Alturas de Carga, para Ambos Sentidos del Sensor Juntos	24.

Rodrigo Andrés Sepúlveda Chamblas Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío. rsepulch@alumnos.ubiobio.cl

Álvaro Suazo Schwencke Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío. asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Los strain gage son dispositivos que se utilizan para medir fuerza a través de desplazamiento axial. Rosenkranz (2012) mostró que para una aplicación en particular del sensor de fuerza, cuando es sometido a flexión, mantiene la proporcionalidad entre la fuerza aplicada y el desplazamiento lateral. Para una nueva aplicación del sensor de fuerza en un medio acuoso es necesario someter al sensor a un proceso de calibración, ya que no se cuenta con métodos de calibración para estos fines. Se propuso un nuevo método de calibración basado en la Norma ISO 3455:2007 de "Calibración de Molinetes" adecuándola a las características propias de operación del nuevo sensor.

Se realizó un análisis experimental para calibrar sensores de fuerza nuevos, asumiendo que la deflexión del sensor se debe a la presión dinámica del flujo. Para determinar la curva de calibración se habilitó un canal hidráulico, donde se realizaron las corridas experimentales. Se tomó como hipótesis que existe una relación de tipo lineal entre la variación voltaje de salida del instrumento y el cuadrado de la velocidad del flujo. Los resultados de los ensayos y del análisis estadístico determinaron que se rechaza la hipótesis planteada. Se encontró que dos de los seis sensores de fuerza presentaron la existencia de una relación del tipo lineal entre ΔVs y la velocidad del flujo. Los sensores se encuentran afectados por la carga hidrostática sobre el sensor. Cada sensor debe ser calibrado en forma independiente, para obtener el valor de las constantes.

Palabras claves: curva de calibración, sensores de fuerza.

7001 Palabras Texto + 11 Figuras/Tablas*250+ 0 Figuras/Tablas*300 = 9751 Palabras Totales.

CALIBRATION OF STRAIN GAGES UNDER WATER IN A LABORATORY CHANNEL

Rodrigo Andrés Sepúlveda Chamblas Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío. ecklipz kings@hotmail.com

Álvaro Suazo Schwencke Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío. asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

The strain gage are devices that are used to measure force through axial displacement. Rosenkranz (2012) showed that for a particular application of a force sensor, maintains the proportionality between the applied force and lateral displacement when it is subjected to bending. For a new application of force sensor in an aqueous medium, it is necessary to undergo a process of calibration sensor, since there is no calibration methods for these purposes. A new calibration method was proposed, adapting the standard ISO 3455:2007 "Calibration of turnstiles", to the specific characteristics of the new sensor operation.

An experimental analysis was performed to calibrate new strain gages, assuming that the deflection of the sensor is due to the dynamic pressure of the flow. To determine the calibration curve is enabled an hydraulic channel, where experimental runs were made. It was taken as a hypothesis that there is a linear relationship between output voltage variation of the instrument and the square of the speed of the flow. The results of the trials and statistical analysis determined that the hypothesis is rejected. It was found that two of the six sensors of force showed the existence of a relationship between ΔVs linear type and the speed of the flow. The sensors are affected by the hydrostatic load on the sensor. Each sensor must be calibrated independently, to get the value of the constants.

Key words: calibration curve, strain gage.

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analizará un sensor de fuerza nuevo que necesita ser calibrado, para el cual no se cuenta con métodos de calibración. Se propuso un nuevo método basado en la adecuación de la Norma ISO 3455:2007 de "Calibración de Molinetes" a las características propias de operación del nuevo sensor.

Se entiende como curva de calibración la relación entre la variable dependiente Variación Voltaje de Salida del instrumento (Δ Vs), con la variable independiente de Velocidad del flujo (u). Para su determinación se habilitó un canal hidráulico, donde se realizaron las corridas experimentales. El método de calibración consiste en desplazar a velocidad constante el sensor de fuerza a un nivel de carga predefinido sobre agua en reposo. Se midió la velocidad del sensor de fuerza asumiendo como válido el principio de acción y reacción del sensor de fuerza sobre agua líquida en reposo. Luego se espera que la velocidad del sensor a velocidad constante sobre el agua en reposo sea equivalente a la velocidad del fluido con el sensor en reposo.

Se tomó como hipótesis que existe una relación de tipo lineal entre ΔVs y el cuadrado de la Velocidad del flujo, la cual se empleará para la determinación de la curva de calibración.

1.1. Descripción del Problema

El sensor de fuerza empleado es un sensor nuevo y no posee una curva de calibración, para lo cual necesita ser calibrado. Asimismo, por tratarse de un sensor nuevo no posee un método normativo regulado para su calibración. Para abordar el primer problema se requiere tener un método de calibración aceptable que permita la calibración instrumental.

En primera instancia se propone un método de calibración, adecuando la Norma ISO 3455:2007 de Calibración de Molinetes a las características propias de operación del nuevo sensor. Se analizaron las dimensiones del canal adoptado y se chequeo la calidad de la señal en relación a la desviación estándar, para verificar que el método de calibración fuera aceptable. Otro indicador que se midió para verificar que el método de calibración fuera aceptable son las incertidumbres de medición, que en base al canal propuesto, se comparó con las incertidumbres de medición permitidas en la Norma ISO 3455:2007, que acepta como valores posibles de una medida el 0,1% del valor real en el nivel de confianza de 95%. Para abordar el segundo problema se realizó una serie de ensayos experimentales para determinar la curva de calibración entre ΔVs y u.

1.2. Base Teórica

Se presentan los antecedentes teóricos que relacionan la velocidad del flujo sobre el sensor y la deformación lateral del sensor (detalles en anexo A) a partir de la siguiente relación:

$$\frac{u^2}{2} = \frac{28P_{cr}}{17\alpha\rho} \frac{\Delta V_s}{V_{ref}} \qquad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

 ΔVs : es el cambio Voltaje de salida del sensor.

- u : es la velocidad media relativa entre el sensor y el fluido.
- ρ : densidad del fluido.

Se asume como válido el principio de acción y reacción del sensor de fuerza sobre agua líquida en reposo. Luego se espera que la velocidad del sensor a velocidad constante sobre el agua en reposo sea equivalente a la velocidad del fluido con el sensor en reposo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Hipótesis

Los cambios en los registros del sensor de fuerza pueden ser explicados en función del cuadrado de la velocidad, a partir de una relación del tipo lineal.

1.3.2. Objetivo General

Validar la curva de calibración para un nuevo sensor de fuerza, aplicado sobre medio acuoso.

1.3.3. Objetivos Específicos

- Definir un método de calibración, del sensor de fuerza a través del uso de agua detenida en un canal de laboratorio, modificando el método de calibración empleado para molinetes.
- Obtener las curvas de calibración mediante los ensayos experimentales propuestos.
- Analizar el efecto de la energía potencial sobre las curvas de calibración.

2.- INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para realizar esta investigación, se requiere determinar la relación existente entre ΔVs y u². Para ello se requiere habilitar el Canal Hidráulico del Laboratorio del Depto. Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío Bío, para realizar los respectivos ensayos experimentales. El canal es de acrílico y de sección rectangular, sus dimensiones son 12 m de longitud, un ancho de 0,5 m y 0,43 m de altura.

Se trabajó siempre con una altura de agua constante de 20 cm y en reposo. El nivel de agua fue chequeado con regletas milimétricas cada 2 m. El agua quedó detenida colocando una tapa al término del canal, con todo completamente sellado sin filtraciones.

Se implementó en el canal hidráulico un carril metálico para el transporte del carro con una rigidez alta, a fin de evitar la flexión del perfil y asegurar un desplazamiento rectilíneo y uniforme del carro y, por ende, del sensor a calibrar. Se implementó a la estructura del canal por cada metro una sujeción metálica, como soporte de un perfil metálico C-10 de 8 m de longitud, que va soldado y ubicado en la parte superior del canal. El carril fue alineado en plano vertical y horizontal del canal con precisión. Para ello se aplicó una tolerancia de 1 mm, que se midió con ajustes de socalzado y con nivel de agua. Se comprobó la lisura del perfil o, de lo contrario, el carro se moverá con movimiento irregular y causará vibración que puede ser registrada por el sensor y de esta forma distorsionar la calibración.

La Figura 1, muestra la configuración de materiales y equipos empleados en las corridas experimentales.



Figura 1. Esquema de equipos y materiales empleados en las corridas experimentales. (Fuente: Elaboración propia).



Figura 2. Fotografía canal hidráulico del laboratorio. (Fuente: Elaboración propia).

2.1. Protocolo de Ensayo para Corridas Experimentales

- Se prepara el canal hidráulico siempre con la misma altura de agua de 20 cm.
- Se colocan los dos sensores de temperatura (LM35) enumerados ST1 y ST2 en el agua y aire en el tramo central del canal, en cercanía de una pared.
- Se coloca solo un sensor de fuerza en el carro en cada corrida experimental, a un nivel de carga predefinido sobre el sensor, con precisión milimétrica y siempre estando en sentido positivo el sensor de fuerza en la primera medición y sin modificar el sensor cuando viene de vuelta en sentido negativo.
- Se conectan dos sensores de temperatura y un sensor de fuerza al Sistema de Adquisición de señal.
- Se conecta el equipo de medición al computador portátil a través de puerto COM.
- Se energizan los equipos de medición mediante una fuente de poder.
- Se ejecuta el programa Arduino desde el computador portátil y se habilita el puerto COM de comunicación para el registro de datos. La tasa de registro es de 14 datos/seg. Cada registro está constituido por el promedio de 240 pulsos del sensor.
- Se espera 900 segundos hasta que se estabilicen los sensores antes de cada corrida experimental.
- Se inicia el ensayo experimental propiamente tal moviendo el carro a velocidad constante, desde un extremo al otro del canal, con un nivel de carga sobre el sensor predefinido.
- Durante cada ensayo se registra el tiempo inicial (Ti) que es el instante de tiempo justo cuando comienza a moverse el carro y el tiempo final (Tf) que es cuando el carro se detiene después de su recorrido por los 8 metros, también se registró el tiempo medido (Tm) que es el tiempo que se toma con cronómetro de los 4 metros centrales donde circula el carro.
- Entre cada ensayo experimental esperamos 300 segundos para que se estabilicen los sensores y se vuelve a mover el carro con el sensor hacia el otro extremo del canal (sentido negativo) con velocidad constante y el mismo nivel de carga sobre el sensor. Se hacen los mismos registros de tiempo indicados en el punto anterior.
- Los procedimientos anteriores se repiten al menos cinco veces con velocidades distintas y manteniendo el nivel de carga predefinido constante.
- Terminada la corrida experimental se esperan 600 segundos y se procede a grabar los datos experimentales entregados por los sensores de temperatura y fuerza.

Para finalizar el protocolo experimental, se graba el registro de datos en un archivo de texto, para su análisis y posterior procesamiento, con información de: Tiempo medido (Tm), Tiempo inicial (Ti), Tiempo final (Tf), ST1 (°C), ST2 (°C), SFi (mV).

Para cumplir con el segundo objetivo específico se aplicó el protocolo experimental sobre los sensores SF1, SF2, SF3, SF4, SF5, SF6 para el nivel de carga de 10,0 cm sobre el sensor. Para cumplir con el tercer objetivo específico se aplicó el protocolo experimental sobre el sensor SF4 para los niveles de carga de 2,5 - 5,0 - 7,5 - 10,0 - 12,5 - 15,0 - 17,5 cm de carga sobre el sensor.

3.- PROPUESTA DEL MÉTODO CALIBRACIÓN

El método de calibración se entiende por la forma de determinar la relación entre ΔVs y u.

Se adaptó el canal hidráulico existente en el Laboratorio de la Universidad del Bío Bío, que en comparación con los canales de calibración de molinetes posee una relación de escalas de aproximadamente 1:4.

Para llevar a cabo la propuesta del método de calibración, se analizaron las siguientes características y/o requisitos: a) Dimensiones del canal de calibración adoptado, b) Sistema de desplazamiento del sensor, c) Sistema de registro de información, d) Otros requerimientos, e) Calidad de la Señal.

3.1. Dimensiones del Canal de Calibración Adoptado

3.1.1. Longitud del Canal

El canal habilitado tiene una longitud total de 12 m de los cuales se emplearon 8m, que comprende una zona de aceleración (La) de 2 m, una zona de medición (Lm) de 4 m y una zona de frenado (Lf) de 2 m.

3.1.2. Profundidad del Canal

El nivel de altura de agua puede producir el efecto Epper (ISO3455, 2007), particularmente cuando la velocidad del carro coincide con la velocidad de propagación de la onda de superficie.

La velocidad crítica (VC), está relacionada con el efecto Epper, dada por:

Vc =
$$\sqrt{g * d} = \sqrt{9.81 * 0.2} = 1.4$$
 m/s Ec. (8)

- g : es la aceleración de gravedad (m/s²) = 9,81 m/s²
- d : altura del agua (m) = 0,2 m

Este fenómeno, conocido como el efecto Epper, puede provocar un error en la calibración dentro de una banda, en el rango de velocidad (u) entre 0,5*Vc < u < 1,5*Vc. (ISO3455, 2007).

Para este caso el error asociado al efecto Epper estaría dado entre 0,7 m/s y 2,1 m/s. Por lo tanto no afectaría, debido a que la mayor velocidad utilizada en la propuesta fue de 0,6 m/s.

3.2. Sistema de Desplazamiento para el Sensor

3.2.1. Características del Carro

El carro es un dispositivo móvil que sostiene el sensor (Figura 2), llevándolo a una velocidad constante a lo largo del carril. Se utilizó un carro de 40 cm de longitud, 8 cm de ancho y 8 cm de altura.

Para sostener el sensor se implementó un tubo de 15 mm, que fue soldado al carro y en el cual se introdujo el sensor, que se fijaba con dos pernos en la parte inferior del tubo.

Para lograr que el cable conector esté alineado correctamente en el inicio de una corrida experimental y que no se balancee cuando las mediciones se inicien, se implementó en la parte superior del carro, un sujetador metálico que levante el cable y lo fije, con el fin de que no se distorsione la señal instrumental.

Para verificar que no exista deslizamiento del carro, se empleó un sistema de rodamientos de 3 cm de diámetro en las orillas y en la parte inferior del carro.

3.2.2. Dispositivo Rotacional

Es un elemento guiado manualmente en forma rotacional que permite el desplazamiento longitudinal del carro (Figura 2), mediante el uso de lienza y poleas adecuadamente implementadas como sistema de transmisión a lo largo del carril.

Para asegurar que la velocidad del carro sea constante a lo largo del carril se debe aplicar una velocidad angular constante al dispositivo rotacional, tal que el desplazamiento del carro sea constante.

El dispositivo rotacional guiado manualmente permite generar velocidades entre 0,05 m/s a 0,6 m/s, teniendo siempre la precaución de que las velocidades fueran constates.

Para asegurar la estabilidad del carro y evitar el deslizamiento o balanceo durante el funcionamiento normal a cualquier velocidad en el rango especificado, se agregó un contrapeso en el carro y se procedió a tensar la lienza unida al carro en forma manual hasta que no exista holgura en el sistema de desplazamiento.

La lienza debió ser lo suficientemente fuerte para soportar la carga del carro que tenía que transportar durante la calibración y las condiciones de humedad que prevalecen en el laboratorio de calibración.

3.3. Sistema de Registro de Información

Para obtener las curvas de calibración de este sensor se debió encontrar una relación entre las variables ΔVs (mV) y la variable u (m/s). Estas variables se midieron de la siguiente manera:

- Velocidad del carro (u): (en m/s). Se obtuvo con la relación u = Lm /Tm, donde Lm es el largo de la zona de medición, Tm es el tiempo medido en segundos. El tiempo medido se obtiene con cronometro digital con precisión ±0,01 s.
- Altura de Carga (h): (en mm). Es la profundidad o carga del sensor dentro del agua del canal, medida desde la superficie libre. La profundidad se midió con una regla milimétrica, que fue colocada en la varilla de cobre del sensor.
- *Voltaje de Salida (Vs):* (en milivoltios, mV). Se obtiene directamente en tiempo real desde el Sistema de Adquisición de señal como voltaje de salida.
- *Temperatura del Agua:* Se utilizó el sensor ST1 (°C), la unidad de medida es en grados Celsius (°C). Se obtiene para corregir la densidad y viscosidad del agua en caso de ser requerido.
- *Temperatura del Ambiente:* Se utilizó el sensor ST2 (°C), la unidad de medida es en grados Celsius (°C). Se obtiene para controlar que no existan diferencias apreciables entre la temperatura del agua y del aire.

El equipo de medición fue diseñado con sistema electrónico aislado y capacitancias altas para evitar efectos de variación de voltaje en la red. Los sensores se encuentran electrónicamente aislados del ambiente y la señal es filtrada a través del promedio de 240 pulsos por cada registro. Luego las señales solo pueden ser distorsionadas por movimientos del carro y del agua. Como el agua en el canal permanece en reposo, el registro de la señal instrumental durante ese tiempo es asumido como error instrumental o ruido.

3.4. Otros Requerimientos

Con el fin de aumentar la eficiencia del proceso de calibración, la inclusión de los siguientes equipos en laboratorio, es lo recomendable:

- Cambiar el agua del canal todos los días para mantenerlo libre de crecimiento algas o polvo en suspensión.
- Tener dispositivos de amortiguación para reducir la perturbación del agua, como aquietadores laterales o tanque de acumulación en uno o ambos extremos del canal.
- Contrarrestar la tensión generada por los cables de los sensores de temperatura y fuerza, mediante un contrapeso en el carro. El cable debe estar alineado correctamente en el inicio de una corrida experimental y evitar que se arrastre por el suelo o balancee durante las mediciones, con el fin de que no se distorsione la señal instrumental debido a problemas en conectividad.

3.5. Calidad de la Señal

3.5.1. Incertidumbres de la Medición del Canal Propuesto

El canal de calibración propuesto presenta incertidumbres en la medición debido a:

 a) Error relativo del tiempo medido (ɛt): Es el mayor error de precisión que se pudiera obtener de la medición del tiempo que demora el sensor en recorrer la zona de medición.

Para medir el tiempo que demora el sensor en recorrer la zona de medición se utilizó un cronómetro digital con una precisión de 0,01 s.

 $\varepsilon t = ((precisión/Lm_{minimo})/u_{max}) * 100 = ((0,01/4)/0,6) * 100 = 0,15\%$

Las dimensiones del canal empleado entregan un error relativo de medición del tiempo de 0,15% que es un poco mayor al 0,1% que es considerado como aceptable en función de la Norma ISO 3455:2007.

Para cumplir con el fin de limitar el error relativo en la medición del tiempo a 0,1%, la duración del ensayo debe ser de al menos 10 s a la velocidad máxima.

 b) Error Relativo de distancia recorrida (ɛL): Es el mayor error de precisión que se pudiera obtener de la medición de la distancia recorrida por el sensor. Para el canal habilitado la distancia recorrida de 4 m se obtuvo con huincha metálica milimétrica, el error de precisión es 0,001 m. El error relativo se obtuvo a partir de la siguiente relación:

 $\varepsilon L = (Precisión / Lm) * 100 = (0,001 / 4) * 100 = 0,025\%$

El error relativo de la distancia recorrida es menor al valor 0,1% que es considerado como aceptable en función de la Norma ISO 3455:2007.

c) *Error relativo de la señal instrumental* (ɛI): Es el mayor error de precisión que se pudiera obtener de la medición del voltaje de la señal instrumental.

Se inicia el registro de datos en el puerto COM con tasa de 14 datos/seg. Cada registro es obtenido de 240 pulsos promediados. El error se obtuvo a partir de la siguiente relación:

 $\epsilon i = ((1 / N^{\circ} Pulsos) / 0,001))/140 = ((1 / 240) / 0,001))/140 = 0,03\%$

El error relativo de la señal instrumental es menor al valor 0,1% que es considerado como aceptable en función de la Norma ISO 3455:2007.

3.5.2. Ruido Instrumental

En la Figura 3 se muestra la desviación estándar de la señal instrumental antes de comenzar el ensayo experimental (flujo en reposo) para el sentido positivo y negativo del sensor (detalles en anexo B). En la línea continua se coloca el valor de precisión instrumental para verificar la consistencia del instrumento. Se observa que la generalidad de los datos de desviación estándar a niveles de carga mayores a 10 cm, quedan bajo el nivel de precisión instrumental. En la dirección negativa se aprecia un incremento de dispersión por sobre 1,1 mV, para pocos datos con altura de carga menores a 7,5 cm.

Para alturas de carga menores a 7,5 cm habría ruido en la señal registrada, pero inferior al doble del nivel de precisión instrumental.

Los mayores niveles de ruido se presentan en mediciones superficiales con h= 2 cm de carga. Esto puede ser atribuido a pequeñas oscilaciones superficiales del agua que generan pequeños cambios de presión.



Figura 3. Desviación estándar de la señal instrumental para el sensor SF4 antes de comenzar el ensayo experimental (flujo en reposo) para el sentido positivo (izquierda) y negativo (derecha) del sensor. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 4 se muestra la desviación estándar de la señal instrumental durante la realización del ensayo experimental para el sentido positivo y negativo del sensor (detalles en anexo B). En la línea continua, se coloca la línea de tendencia cuadrática del ruido instrumental obtenido. Se observa una relación de tipo cuadrática para el rango velocidades de 0,05 m/s < u < 0.6 m/s. A medida que aumenta la velocidad del carro, la desviación estándar de la señal se acrecienta debido al incremento de turbulencia en el flujo, atribuido a una mayor interacción entre el sensor y el fluido. La dispersión sobre la línea de tendencia se atribuye a la variación experimental. Para velocidades mayores a 0,3 m/s el nivel de ruido aumenta. La mayor dispersión para la altura de carga de 17,5 cm, es atribuida a que se produjo un salto en la señal, que se puede deber a un problema de conexión.

El efecto de distintos instantes de tiempo sobre la señal instrumental se muestra en el anexo C.



Figura 4. Desviación estándar de la señal instrumental durante la realización del ensayo experimental para el sentido positivo (izquierda) y negativo (derecha) del sensor. (Fuente: Elaboración propia).

4.- DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

Curva de calibración es una relación entre dos variables, en este caso, una dependiente que es ΔVs , con una variable independiente u. Para obtener la relación entre ambas se realizaron ensayos experimentales en un canal hidráulico. Cada corrida experimental es un conjunto de ensayos a una altura de carga fija y a diferentes velocidades del carro. Cada corrida experimental consta de 10 ensayos, cinco en sentido positivo del sensor y cinco en el sentido negativo.

4.1. Características y Registros de los Ensayos Experimentales

Se introduce un sensor de fuerza para cada ensayo experimental y dos sensores de temperatura al canal hidráulico con una altura de escurrimiento de 20 cm que se mantiene fija en todas las rondas de ensayos experimentales. Estos tres sensores fueron conectados al sistema de adquisición de señal. El sensor de fuerza fue ubicado en el carro (sumergido en el agua) cerca del centro del canal, los sensores de temperatura se ubicaron uno introducido en el agua y el otro dentro del canal hidráulico pero en el aire.

Se agruparán los datos registrando los tiempos en que se llevan a cabo las corridas experimentales (el tiempo en que empieza a moverse el carro y el tiempo en que termina su recorrido) a lo largo de los 8 m del perfil metálico, para la ida y vuelta del carro, en simultáneo con los datos que fue entregando el sistema de adquisición de señal. También se fue registrando el tiempo medido como el tiempo que demora en trasladarse el carro por la zona de medición (Lm) y fue medido con cronómetro digital.

4.2. Resguardos Específicos para cada Corrida Experimental

Con la finalidad de disminuir los errores accidentales en las mediciones, éstas se llevaron a cabo con la colaboración de tres personas. Estas personas mantuvieron la misma labor durante todas las corridas experimentales. El primer ayudante se encargó de anotar los registros de las mediciones en el computador. El segundo ayudante estuvo exclusivamente a cargo del cronómetro para tomar los tiempos empleados en la zona de medición. Además el segundo ayudante estuvo encargado de dar aviso el momento justo en que se tiene que detener el carro a la persona que lo está guiando y a la persona del computador para que ésta anote el registro justo en el momento en que se detuvo el carro. El tercer ayudante estuvo a cargo de guiar el carro a través del dispositivo rotacional observándolo exclusivamente para

no distraerse con el movimiento del carro, para que así el carro se mueva siempre a una velocidad constante.

Los ensayos se realizaron en las mañanas en que la variación térmica de las temperaturas del agua y del aire no supera los 2°C. Se tomó esta precaución a fin de que la señal instrumental no sea muy inestable, como también, para evitar que se produjeran movimientos inesperados del fluido, debido a la vibración por trabajos en el laboratorio, los que podría registrar el sensor y de esta forma distorsionar los datos registrados en las mediciones.

4.3. Adquisición de Datos

La información de los datos de voltaje de salida Vs (mv), los datos de temperatura ambiente T (°C) y el registro del instante de tiempo T(s) asociado a cada dato cuando el carro estuviera en movimiento, fue capturada y registrada por el sistema de adquisición de señal mediante una plataforma open source consistente de un micro controlador marca Arduino modelo Mega 1280, que toma la señal de voltaje de salida y la almacena a un computador portátil a través del puerto COM. Con esta información se estimaron las variables de ΔVs y velocidad (u) para determinar las curvas de calibración.

4.4. Obtención del ∆Vs y u

Para obtener los valores de ΔVs primero se debió analizar la señal y encontrar los valores de Vs, Vso, Vp y Vc. La Figura 5 muestra la señal Vs en el tiempo.



Figura 5. Esquema de los parámetros para obtener $\Delta Vs.$ (Fuente: Elaboración propia).

Se empleó una planilla Excel para el manejo de las variables definidas:

- Voltaje de Salida (Vs) [mV]: El valor se obtuvo a partir del promedio de los valores de voltaje de salida Vs (mV), durante el tiempo medido inicial (Tmi) y el tiempo medido final (Tmf), registrados por el equipo de medición. Donde Nvs es el número de datos entre Tmi y Tmf.

$$Vs = \frac{1}{N_{Vs}} \sum_{t=1}^{N_{Vs}} Vs(t)$$

- *Voltaje de Salida (Vso):* El valor de Vso (mV) Voltaje de salida inicial, se obtuvo del promedio de los datos registrados de voltaje de salida, durante los 20 segundos antes que el carro comience a moverse en su recorrido experimental.

$$Vso = \frac{1}{N_{Vso}} \sum_{t=1}^{N_{Vso}} Vs(t)$$

 Voltaje de Salida (Vp): El valor de Vp (mV) se obtuvo del promedio de los datos registrados de voltaje de salida, durante los 19 s y 21 s después que el carro termine de moverse en su recorrido experimental.

$$Vp = \frac{1}{N_{Vp}} \sum_{t=1}^{N_{Vp}} Vs(t)$$

- *Voltaje de Salida (Vc):* El valor de Vc (mV) del factor de corrección de voltaje de salida se obtuvo del (Vp) restándole el voltaje de salida inicial (Vso) con la siguiente ecuación:

$$Vc = \frac{1}{2} * (Vp - Vso)$$

- *Voltaje de Salida (\Delta Vs):* Se obtuvo a partir de los valores de voltaje de salida (Vs) en mV, registrado por el equipo de medición, restándole el voltaje de salida inicial (Vso) en mV y el voltaje de salida del factor de corrección (Vc) en mV, con la siguiente ecuación:

$$\Delta Vs = Vs - Vso - Vc$$

Velocidad del carro (u) [m/s]: Se obtuvo a con la relación u = Lm /Tm, donde Lm es el largo de la zona de medición que consta de los 4 m centrales y Tm es el tiempo medido en segundos que se obtiene con cronometro, en que el carro atraviesa la zona de medición.

5.- TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

5.1. Metodología

Para determinar la curva de calibración del sensor de fuerza, se debe obtener la ecuación que mejor exprese la relación entre voltaje de salida y el cuadrado de la velocidad del sensor. Para encontrar esta relación se asumió que la velocidad del carro es igual a la velocidad del sensor respecto del fluido. La relación se obtiene a través de un análisis de regresión simple. Para cada corrida experimental se asumió una relación de tipo lineal, la que se muestra en forma gráfica $\Delta Vs(mV) v/s u^2(m/s)$. Se seleccionó un modelo de tipo $\Delta Vs = \alpha * u^2 + \beta * u + \gamma$ tentativo inicial. Luego se obtuvieron los parámetros del modelo por medio del método de mínimos cuadrados y a continuación se evaluó si los valores de los parámetros son significativos o no para el modelo. Todo esto se llevó a cabo con el programa estadístico SPSS estimando los intervalos de confianza a través del valor (t-student) para el 95% de nivel de confianza y verificar la hipótesis planteada.

Para determinar los parámetros del modelo que son realmente significativos se utilizaron los intervalos de confianza, que consisten en que para el valor del parámetro del modelo que contenga al cero, este valor del parámetro no se puede distinguir del valor cero y, por lo tanto, este parámetro no es significante para el modelo.

5.2. Resultados de Significancia de los Parámetros

A partir del análisis de los resultados se valida o rechaza la hipótesis planteada y se propondrá el modelo que represente de mejor forma el ajuste de los datos.

En la Tabla 1 se muestran los valores de significancia, los valores t (t-student) y los intervalos de confianza de 95% de cada corrida experimental, para analizar la significancia de cada uno de los parámetros del modelo, para poder expresar el modelo sólo con los parámetros más significativos y ver si se valida o rechaza la hipótesis planteada.

	γ		β		α								
Sensor	t	sig	Límite Inferior	Límite Superior	t	sig	Límite Inferior	Límite Superior	t	sig	Límite Inferior	Límite Superior	Hipótesis
SF1	39.447	0	9.101	10.129	2.911	0.01	2.252	14.115	1.215	0.241	-6.179	22.956	Se Rechaza
SF2	8.885	0	15.171	24.522	-0.419	0.68	-65.451	43.634	1.739	0.098	-21.67	234.203	Se Rechaza
SF3	8.413	0	56.003	93.493	6.726	0	505.424	967.452	-3.97	0.001	-2096.353	-641.309	No Se Rechaza
SF4	1.196	0.25	-0.487	1.731	9.153	0	42.296	67.974	2.062	0.057	-1.037	62.604	Se Rechaza
SF5	2.009	0.062	-0.068	2.522	-1.466	0.167	-26.303	4.971	4.555	0	44.328	121.497	No Se Rechaza
SF6	1.405	0.18	-2.461	11.983	0.062	0.951	-89.251	94.594	2.057	0.058	-9.323	521.32	Se Rechaza

Tabla 1. Significancia de los Parámetros:Programa Microsoft Excel, Extracción Programa IBM SPSS Statistics 21.

(Fuente: Elaboración propia).

Se muestra en la Tabla 1 que para los sensores SF3, SF5 no se rechaza la hipótesis planteada puesto que el valor de la constante α es significativo. Por el contrario, en el caso de los otros sensores se rechazó la hipótesis planteada. Luego, conociendo la significancia de los parámetros, se procede a obtener el modelo ajustado de regresión para cada uno de los sensores. Ahora, en términos de exposición de un modelo, se puede expresar éste sólo con las variables más significativas.

5.3. Curvas de Calibración Propuesta para cada Sensor

5.3.1. Propuesta de Modelo para los Sensores que no se Rechaza la Hipótesis

Para los sensores SF3 y SF5 se validó la hipótesis planteada puesto que el valor de la constante α es significativo. En el caso del SF3 se propuso que la relación es de tipo cuadrática $\Delta Vs = \alpha * u^2 + \beta * u + \gamma$, ya que son significativos β y γ , en cambio para el sensor SF5 se propuso que la relación es de tipo lineal con el cuadrado de la velocidad $\Delta Vs = \alpha * u^2$, sólo con el término cuadrático puesto que β y γ no son significativos. Se obtuvieron los parámetros del modelo y las curvas de calibración por medio del método de mínimos cuadrados con el programa de ajuste Excel (datos en anexo D).

En la Figura 6 se muestra la relación del tipo lineal con el término cuadrático del sensor SF5, entre la serie de datos asociada a $\Delta Vs (Vs - Vs_o - Vc) v/s u^2$.



Figura 6. Variación de voltaje de salida y el cuadrado de la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF5. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 7 se muestra la relación del tipo cuadrática para el sensor SF3 entre la serie de datos asociada a $\Delta Vs (Vs - Vs_o - Vc) v/s u$.



Figura 7. Variación de Voltaje de salida y la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF3. (Fuente: Elaboración propia).

De la Figura 6 se puede apreciar que la ecuación de calibración del sensor SF5 es lineal y presenta pendiente positiva, pero en el sentido negativo se generan problemas en la medición, esto puede deberse a que el sensor está midiendo bien pero por ese sentido está con problemas o porque el sensor registra sólo por un sentido.

De la Figura 7 se puede apreciar que la ecuación de calibración del sensor SF3 es lineal para el sentido positivo del sensor. Pero no presenta tendencia y tampoco simetría, esto se puede deber a que el sensor registra sólo por un sentido.

5.3.2. Propuesta de Modelo para los Sensores que se Rechaza la Hipótesis

En el caso del sensor SF1 se propuso un modelo de tipo lineal $\Delta Vs = \beta * u + \gamma$ puesto que β y γ son significativos, mientras que para el sensor SF4 también se propuso un modelo de tipo lineal $\Delta Vs = \beta * u$ pero sólo con el término velocidad puesto que α y γ no son significativos. Para el caso del sensor SF2 el mejor modelo es una constante y, por último, para el sensor SF6 ningún parámetro tiene significancia, por lo tanto, estos sensores no están midiendo bien. En el caso del sensor SF6 no mide nada y por lo tanto se eliminaron del análisis (curvas de calibración en anexo E).

En la Figura 8 se muestra la relación del tipo lineal entre la serie de datos asociada a ΔVs (Vs - Vs_o -Vc) v/s u, para cada corrida experimental de los sensores SF1 y SF4.

Se puede apreciar que las ecuaciones de calibración de los sensores SF1 y SF4 son lineales y presentan pendiente positiva, lo que indica que hay una relación entre voltaje de salida y la velocidad del sensor, es decir, que a medida en que aumenta la velocidad, aumenta el voltaje de salida. La tendencia de las curvas de calibración de ambos sensores es lineal y simétrica.

Al existir un Coeficiente de determinación sobre un 98% (Figura 8), deja en evidencia que fue correcto analizarlo de forma lineal para el sensor SF4. Para el sensor SF1 se puede apreciar que al aumentar la pendiente de la curva, no aumenta tanto el voltaje de salida y también que su coeficiente de determinación no es tan alto en comparación al sensor SF4, esto puede deberse a que el sensor está midiendo bien correcto analizarlo de forma lineal, pero se generan problemas en las mediciones para velocidades pequeñas inferiores a 0,1 m/s.



Figura 8. Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos de los sensores SF1 y SF4. (Fuente: Elaboración propia).

5.4. Efecto de la Energía Potencial para el Sensor SF4 a distintas Alturas de Carga

Para analizar el efecto de la energía potencial sobre las curvas de calibración. Se utilizó sólo el sensor SF4 que presenta un mayor ajuste y además presentó en sus respuestas: Menos ruido, señales más estables en el tiempo y menos problemas de conexión como se muestra en el anexo C.

Se aplicó el mismo protocolo de ensayo para las corridas experimentales a las siguientes alturas de carga: 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, y 17.5 cm. Para cada una se asumió una relación del tipo lineal entre la serie de datos asociada a $\Delta Vs v/s$ u.

En la Tabla 2 se muestran las alturas de carga, las ecuaciones de regresión y los coeficiente de determinación (\mathbb{R}^2) de cada corrida experimental, para analizar la significancia de la curvas de ajuste, para hacer una comparación de las regresiones, junto con exponer la tendencia del sensor para cada altura de carga (detalles en anexo F).

N° de Corrida:	h(cm)	Tendencia	R²
Corrida Experimental 1	2	∆Vs = 35.93*u -4.11	0.9
Corrida Experimental 2	5	∆Vs = 35.82*u +10.04	0.78
Corrida Experimental 3	7.5	∆Vs = 74.47*u +13.67	0.95
Corrida Experimental 4	10	∆Vs = 85.53*u -13.04	0.963
Corrida Experimental 5	12.5	∆Vs = 100.8*u +12.35	0.978
Corrida Experimental 6	15	∆Vs = 91.92*u -3.84	0.982
Corrida Experimental 7	17.5	∆Vs = 109.25*u +14.31	0.934

Tabla 2. Resumen de Regresión Lineal del Sensor SF4 a Diferentes Alturas de Carga,para Ambos Sentidos del Sensor Juntos.

(Fuente: Elaboración propia).

La corrida experimental N° 2 de altura de carga 5 cm presentó un coeficiente de determinación muy bajo en comparación a las otras alturas de carga. Esto puede atribuirse a un ajuste de la resistencia variable que se llevó a cabo en esa corrida experimental en particular.

Al existir coeficiente de determinación sobre un 95% (Tabla 2), deja en evidencia que fue correcto analizarlo de forma lineal, para alturas de carga mayores a 7,5 cm.

Se puede apreciar que a excepción de la altura de carga 15 cm, al aumentar la altura de carga para el sensor SF4 y manteniendo la velocidad del sensor se produce un incremento en el coeficiente de regresión del Δ Vs.

Se observa que todas las ecuaciones de calibración son lineales y presentan pendiente positiva respecto a la velocidad, lo que indica que hay una relación entre voltaje de salida y la velocidad del sensor, es decir, que a medida en que aumenta la velocidad, aumenta el voltaje de salida.

En la Figura 9 se muestran las relaciones entre el coeficiente de regresión β v/s h y entre la constante γ v/s h, para cada corrida experimental del sensor SF4 a siete alturas de carga diferentes. Se incluyen sus respectivas líneas de tendencia. Se puede apreciar que la altura de carga tiene incidencia significativa (ANOVA. F= 33,27 para un 95% de nivel de confianza) sobre la medición instrumental ya que se muestra una tendencia del tipo lineal con pendiente positiva. Como la tendencia es significativa la variación de la pendiente de la curva de calibración es explicada por la variación de la altura de carga sobre el sensor en un 87%. Se observa que la constante γ no está relacionada con la altura de carga del sensor, por lo tanto, puede deberse exclusivamente a un problema instrumental.





6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones:

El método de calibración propuesto es adecuado. No obstante, ocurren incertezas mayores al 1% para velocidades del sensor superiores a 0.4 m/s. Estas incertezas pueden eliminarse si se incrementa la longitud de la zona de medición del canal a 6 m.

Sólo los sensores SF3 y SF5 no rechazaron la hipótesis planteada. Se apreció que los sensores sólo miden por un sentido de aplicación (curva de calibración no simétrica) lo que tiende a dar una relación de tipo cuadrática, por lo cual se produce un error tipo II (Acepta Hipótesis Falsa). Sin embargo la curva de calibración en el sentido positivo de aplicación presenta una relación de tipo lineal.

De los cuatros sensores en que se rechaza la hipótesis, se encontró que dos de los sensores de fuerza presentaron la existencia de una relación de tipo lineal entre ΔVs y la velocidad del flujo. No obstante, cada sensor debe ser calibrado en forma independiente, ya que las constantes de la ecuación de calibración son distintas.

La presión estática (carga hidráulica) tiene incidencia sobre la señal de la medición instrumental, ya que a medida en que aumenta la altura de carga, se produce un aumento de la presión sobre el sensor provocando una variación en la pendiente de la curva de calibración del sensor propuesto. La carga hidráulica solo afecta la constante de la relación de tipo lineal propuesta. La propuesta de calibración de tipo lineal resulta adecuada aunque sea afectada por la carga hidráulica.

6.2. Recomendaciones:

Aumentar la zona de medición del canal para cumplir con los requisitos de la Norma ISO 3455:2007, que fue el único requisito del canal propuesto en que se genera una incerteza levemente superior al 1%.

Para cumplir con el fin de limitar el error relativo en la medición del tiempo a 0,1%, la zona de medición del canal debiese ser de 6 m de largo como mínimo. La longitud total del canal debería ser de alrededor de 10 m, de los cuales 6 m serían para la zona de medición, 2 m serían para la zona de aceleración y 2 m para la zona de frenado.

Implementar un motor eléctrico, para poder constatar que el carro se desplace a velocidad constante.

No es recomendable hacer el ajuste de la resistencia variable del instrumento en medio de una corrida experimental, puesto que los sensores no cambian instantáneamente y necesitan tiempo de estabilización.

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, Ven Te (1994). "Hidráulica de canales abiertos", McGraw-Hill.
- IBM Corporation 1989, 2012. Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 21. [en línea] <u>ftp://public.dhe.ibm.com/software/analytics/spss/documentation/statistics/21.0/es/client/Man</u> <u>uals/IBM_SPSS_Statistics_Core_System_Users_Guide.pdf</u>.
- ISO 3455:2007(E) Hydrometry Calibration of current-meters in straight open tanks.
- Montgomery, Douglas (2012). "Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería", Limusa.
- Ortiz, L. (1991). "Resistencia de Materiales", McGraw-Hill, Interamericana de España S.A.
- Reyes, L. (2009). "Puente de Wheatstone". Electrónica y Microelectrónica para Científicos.
- Rosenkranz, A. (2012). "*Análisis experimental de Strain Gage sometida a flexión*". Proyecto para obtener título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío.

29

<u>ANEXOS</u>

ANEXOS.

Anexo A: Antecedentes teóricos que relacionan la presión que ejerce el fluido sobre el sensor y la deformación lateral del sensor.

El sensor de fuerza al ser deformado por fuerzas externas provoca un cambio en la resistividad eléctrica ΔR (Ω) respecto a una resistividad inicial Ro (Ω). El Puente de Wheatstone (PW) (Reyes, 2009) permite medir la variación de resistencia eléctrica en [mV] mediante la relación:

$$\frac{Vab}{Vref} = \frac{1}{17,1} \left(\frac{\Delta R}{Ro} \right) \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde Vab (mV) es el voltaje obtenido con el PW; y Vref instrumental es de 5000 mV que es el voltaje de referencia del circuito electrónico.

El voltaje generado por el PW (Vab) revela que la caída de tensión es muy pequeña y se requiere de un amplificador de instrumentación (AI) para acondicionar el voltaje de salida. Se empleará una amplificación 914 veces, dando lugar al Voltaje de salida instrumental (Vs). El Sistema de Adquisición de Señal (SAS) está formado por el PW y el AI. Éste registró la señal del sensor de fuerza.

A partir de la ecuación diferencial de la elástica se puede mostrar que para una viga en voladizo (Figura a-1), la resultante de las presiones externas sobre el sensor es proporcional a la deformación lateral (Ortiz, 1991). Asumiendo que el sensor empotrado puede ser modelado como una viga en voladizo. La resultante de las presiones externas es la suma de la presión dinámica (Pd) y la presión estática (Pe), pero en este caso en particular se consideró que la deformación del sensor se debe sólo a la Pd, puesto que la Pe se encuentra equilibrada. Cabe notar que el sensor inmerso en el fluido está comprimido a un nivel de carga igual a dos veces la Pe y se desconoce si tiene incidencia sobre la medición instrumental.



Figura a-1. Distribución de fuerzas de presiones externas sobre el sensor. (Fuente: Elaboración Propia).

Asumiendo que las presiones externas se encuentran en equilibrio dinámico con las tensiones internas del sensor (Ley de Navier) cuando el sensor es sometido a flexión pura y sujeta a giros pequeños de la viga en voladizo (Ortiz, 1991), se puede obtener la deflexión (deformación lateral) en cualquier punto de la línea elástica del Strain Gage y está dada por:

$$y(z) = \frac{P_d b L^4}{E I_z} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{z}{L} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{z}{L} \right)^3 + \frac{1}{24} \left(\frac{z}{L} \right)^4 \right] \quad \text{Ec.}(2)$$

Donde

y : es el desplazamiento lateral del sensor.

z : es la escala de posición desde el empotramiento (0, L).

L : es la longitud del sensor en voladizo.

b : es el ancho del sensor en voladizo.

Pd : es la presión dinámica ejercida sobre el sensor (N/m^2) .

EIz: es el producto entre el módulo de elasticidad (E) y el momento de Inercia (Iz) del sensor, que permanece constante en la dirección axial al ser prismático.

Se puede demostrar que la presión normalizada P/Pcr es proporcional a la deformacion lateral normalizada y/(L/2) y esta dada por:

$$\frac{P_{d}}{P_{cr}} = \frac{28}{17} \frac{y(L/2)}{L/2} \qquad \text{Ec. (3)}$$

De Ec. (3) se puede observar que existe una relación de tipo lineal entre la presión y la deformación lateral en el centro de presiones. Donde la presión dinámica Pd está normalizada por la presión crítica dada por: $P_{cr} = \frac{48EI_z}{7bL^3}$ en que Pcr es el valor de presión necesario para hacer que el giro sea unitario en el centro de presiones z = L/2 (parámetro que depende solo de la geometría y del material del sensor).

Por otro lado y(L/2) está normalizado por L/2 correspondiente al centro de presión. Para la viga prismática de longitud L y espesor e, la presión crítica estará dada en forma de constante, dado que toma el valor:

$$P_{cr} \approx \frac{4}{7} E \left(\frac{e}{L}\right)^3$$
 Ec. (4)

Rosenkranz (2012), encontró que existe proporcionalidad entre el cambio del Voltaje de salida (Δ Vs) y el desplazamiento lateral y(L/2), para sensores debidamente empotrados (no permite el giro ni el desplazamiento) cercanos al centro de la zona de medición, con un 95% de nivel de confianza y está dada por:

$$\frac{\Delta Vs}{V_{ref}} = \alpha \, \frac{y(L/2)}{L/2} \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde

 V_{ref} : es de 1100 (mV) que es el voltaje de referencia del equipo en desarrollo.

 α : es la constante de proporcionalidad que dependerá sólo del circuito del AI (constantes predefinidas) y de la constante de proporcionalidad del sensor.

Si las Ec. (3) y Ec. (5) se cumplen simultáneamente se puede aseverar que existirá proporcionalidad entre la Presión (Pd) aplicada y el cambio Voltaje de salida (ΔVs) dado a través de Ec. (6), que dependerá sólo de α y Pcr.

$$\frac{P_d}{P_{cr}} = \frac{28}{17\alpha} \frac{\Delta V_s}{V_{ref}} \qquad \text{Ec. (6)}$$

Si se cumple la Ec. (6), y como la presión dinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad, se puede inferir que existirá proporcionalidad entre el cuadrado de la Velocidad (u^2) y el cambio Voltaje de salida (ΔVs) dado a través de la Ec. (7), que dependerá sólo de α , ρ y Pcr.

Anexo B: Datos Experimentales del Ruido Instrumental antes de comenzar y durante los Ensayos Experimentales.

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m / s)	$\sigma Vs(mV)$	$\Delta Vs(mV)$
0.205	1.889	0.042	1.553	3.709
0.181	1.475	0.033	1.597	1.200
0.250	1.636	0.063	1.886	4.065
0.359	1.566	0.129	1.934	10.117
0.514	1.683	0.264	3.042	10.903
0.159	1.470	0.025	1.445	-7.392
0.215	1.553	0.046	1.461	-8.420
0.258	3.191	0.066	1.678	-7.936
0.310	0.966	0.096	2.409	-13.685
0.502	2.689	0.252	6.368	-31.364

• Sensor F4 con 2 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

• Sensor F4 con 5 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m /s)	σVs(mV)	$\Delta Vs(mV)$
0.142	1.044	0.020	1.589	-12.145
0.163	1.643	0.026	1.683	6.597
0.249	1.233	0.062	1.885	14.376
0.330	1.440	0.109	3.569	24.572
0.503	0.893	0.253	5.713	29.780
0.144	1.229	0.021	1.850	12.791
0.180	1.329	0.032	2.397	9.729
0.287	1.101	0.082	2.515	2.010
0.243	1.867	0.059	2.656	3.967
0.481	1.812	0.231	4.970	-16.558

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m/s)	σVs(mV)	∆Vs(mV)
0.068	1.839	0.005	1.356	10.697
0.133	0.892	0.018	0.945	21.519
0.186	1.173	0.035	1.083	28.778
0.243	1.500	0.059	1.225	33.884
0.333	3.541	0.111	1.882	43.833
0.073	0.975	0.005	1.570	5.057
0.120	1.030	0.014	1.295	3.506
0.165	0.992	0.027	1.592	3.052
0.260	1.293	0.067	1.720	-6.910
0.396	1.496	0.157	3.898	-10.454

• Sensor F4 con 7.5 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

• Sensor F4 con 10 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m/s)	σVs(mV)	∆Vs(mV)
0.187	0.872	0.035	2.169	-1.924
0.271	1.028	0.074	1.705	5.217
0.123	1.240	0.015	1.272	1.276
0.454	0.986	0.206	3.084	21.729
0.566	1.011	0.320	6.526	35.881
0.197	1.135	0.039	2.347	-23.402
0.305	0.985	0.093	3.370	-35.146
0.150	0.927	0.023	2.501	-14.752
0.426	1.282	0.182	6.185	-55.575
0.569	1.177	0.324	8.840	-70.311

• Sensor F4 con 12.5 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m/s)	σVs(mV)	∆Vs(mV)
0.084	0.963	0.007	1.443	18.132
0.090	0.833	0.008	0.995	16.213
0.207	0.858	0.043	1.487	33.224
0.366	1.069	0.134	2.072	54.192
0.317	0.771	0.100	2.294	45.347
0.086	0.871	0.007	1.100	-0.426
0.107	1.379	0.012	1.547	-0.959
0.179	1.265	0.032	1.191	-4.321
0.206	0.845	0.043	1.302	-5.163
0.305	1.221	0.093	2.226	-14.620

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m / s)	σVs(mV)	$\Delta Vs(mV)$
0.130	0.896	0.017	1.085	10.994
0.186	0.990	0.035	1.218	18.404
0.293	0.741	0.086	1.745	18.171
0.241	1.071	0.058	1.498	14.406
0.589	0.824	0.347	5.500	48.343
0.138	1.078	0.019	1.343	-11.788
0.172	0.915	0.030	1.545	-16.304
0.335	0.833	0.112	3.260	-33.620
0.268	1.266	0.072	2.493	-27.450
0.554	0.980	0.307	8.940	-62.088

• Sensor F4 con 15 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

• Sensor F4 con 17.5 cm de carga para ambos sentidos del sensor.

u(m/s)	σVso(mV)	u ² (m/s)	σVs(mV)	$\Delta Vs(mV)$
0.218	1.096	0.048	1.436	27.824
0.137	0.823	0.019	1.315	24.396
0.213	0.856	0.046	1.354	30.092
0.321	0.814	0.103	5.599	42.682
0.494	0.773	0.244	5.951	82.592
0.144	0.828	0.021	4.705	13.104
0.169	0.772	0.029	2.878	4.674
0.256	0.879	0.066	2.824	-16.778
0.301	0.944	0.090	2.775	-18.826
0.478	1.195	0.228	5.471	-42.724

Anexo C: Datos Experimentales del Efecto del Tiempo sobre el Ruido Instrumental.

• Efecto del Tiempo Sobre el Ruido Instrumental

En las Figuras c-1 y c-2 se muestra el efecto del tiempo promedio ponderado sobre el valor de la desviación estándar de la señal instrumental antes de comenzar el ensayo experimental (flujo en reposo). Para distintas señales obtenidas se emplearon distintos instantes de tiempo para un nivel de carga de 10 cm y 15 cm respectivamente.

Se observa que en general que el tiempo promedio de 1 s se obtienen los menores valores de desviación estándar de la señal instrumental, todas dando inferiores a 1,1 mV. La desviación estándar tiende a aumentar con el tiempo a partir de los 4 s. A partir de los 10 s la desviación estándar permanece constante, cercana a la precisión instrumental lo que puede considerarse como señal estable.



Figura c-1. Variación de la desviación estándar con respecto al tiempo, antes de comenzar un ensayo experimental, con una altura de carga de 10 cm. (Fuente: Elaboración propia). Corrida experimental 4.



Figura c-2. Variación de la desviación estándar con respecto al tiempo, antes de comenzar un ensayo experimental, con una altura de carga de 15 cm. (Fuente: Elaboración propia). Corrida experimental 6.

• Sensor F4 con 10 cm de carga.

σVso 20(s) +	σVso 15(s) +	σVso 10(s) +	σVso 6(s) +	σVso 4(s) +	σVso 2(s) +	σVso 1(s) +	σVso 0.75(s)	σVso 0.5(s) +	σVso 0.25(s) +
0.872	0.870	0.839	0.700	0.639	0.662	0.646	0.654	0.641	0.477
1.028	1.119	0.963	0.913	0.792	0.689	0.574	0.445	0.405	0.469
1.240	1.342	1.127	1.165	1.298	1.054	0.766	0.713	0.565	0.648
0.986	0.945	0.949	0.974	1.053	1.014	0.964	0.890	0.837	0.458
1.011	1.047	1.074	0.940	0.860	0.779	0.958	0.831	0.816	0.594

• Sensor F4 con 15 cm de carga.

σVso 20(s) +	σVso 15(s) +	σVso 10(s) +	σVso 6(s) +	σVso 4(s) +	σVso 2(s) +	σVso 1(s) +	σVso 0.75(s) +	σVso 0.5(s) +	σVso 0.25(s) +
0.896	0.811	0.833	0.878	0.851	0.706	0.674	0.690	0.652	0.763
0.990	0.984	0.889	0.745	0.798	0.691	0.524	0.447	0.278	0.191
0.741	0.666	0.606	0.616	0.634	0.673	0.774	0.910	1.006	0.263
1.071	1.144	1.082	0.920	0.773	0.813	0.827	0.882	0.918	0.841
0.824	0.849	0.806	0.787	0.785	0.605	0.550	0.474	0.524	0.597

En la Figura c-3 se muestra la Señal instrumental del sensor SF4 que presenta un mayor ajuste y además presentó en sus respuestas: Menos ruido, señales más estables en el tiempo y menos problemas de conexión.





Anexo D: Datos Experimentales para obtener ΔVs para los seis sensores a una altura de carga de 10 cm.

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
900	991	50.78	920.11	970.89	666.83	659.28	656.19	-1.54	0.006	0.079	9.091
1680	1800	65.5	1707.25	1772.75	669.88	661.80	658.00	-1.90	0.004	0.061	9.976
2500	2556	31	2512.50	2543.50	669.13	658.63	658.12	-0.26	0.017	0.129	10.759
3200	3270	41.25	3214.38	3255.63	671.74	661.38	662.52	0.57	0.009	0.097	9.793
3910	3955	25.44	3919.78	3945.22	678.10	665.76	667.64	0.94	0.025	0.157	11.399
4630	4667	20.85	4638.08	4658.93	678.79	665.89	663.89	-1.00	0.037	0.192	13.899
5280	5301	11.75	5284.63	5296.38	679.63	667.07	664.17	-1.45	0.116	0.340	14.017
5940	5966	15.03	5945.49	5960.52	676.98	665.21	664.50	-0.36	0.071	0.266	12.126
6600	6613	7.65	6602.68	6610.33	683.79	666.71	667.63	0.46	0.273	0.523	16.620
7240	7324	47.13	7258.44	7305.57	679.62	670.61	670.64	0.02	0.007	0.085	8.994

• Sensor F1 con 10 cm de carga sentido positivo:

• Sensor F1 con 10 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1300	1378	44.87	1316.57	1361.44	666.47	658.57	658.80	0.11	0.008	0.089	7.789
2100	2199	57.56	2120.72	2178.28	671.81	661.36	665.75	2.20	0.005	0.069	8.252
2860	2899	23.31	2867.85	2891.16	667.20	658.28	659.29	0.50	0.029	0.172	8.419
3570	3609	22.25	3578.38	3600.63	671.69	662.45	661.43	-0.51	0.032	0.180	9.746
4260	4321	34.78	4273.11	4307.89	671.77	662.05	666.58	2.26	0.013	0.115	7.457
4980	5032	30.04	4990.98	5021.02	674.97	669.02	666.78	-1.12	0.018	0.133	7.065
5610	5635	14.19	5615.41	5629.60	673.10	665.61	665.10	-0.25	0.079	0.282	7.741
6270	6290	11.44	6274.28	6285.72	673.07	667.31	666.60	-0.36	0.122	0.350	6.117
6920	6933	7.75	6922.63	6930.38	674.24	669.21	672.31	1.55	0.266	0.516	3.475
7630	7696	39.41	7643.30	7682.71	681.35	671.99	673.18	0.60	0.010	0.101	8.766

• Sensor F2 con 10 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1710	1818	63.45	1732.28	1795.73	650.96	626.99	646.34	9.68	0.004	0.063	14.292
2490	2555	36.72	2504.14	2540.86	644.40	612.69	614.45	0.88	0.012	0.109	30.828
3240	3330	50.72	3259.64	3310.36	722.08	706.40	668.67	-18.87	0.006	0.079	34.540
4020	4082	36.75	4032.63	4069.38	739.86	731.01	696.64	-17.19	0.012	0.109	26.029
4740	4770	17.09	4746.46	4763.55	749.02	744.50	710.77	-16.87	0.055	0.234	21.381
5400	5451	28.6	5411.20	5439.80	752.12	736.22	715.27	-10.48	0.020	0.140	26.381
6090	6104	7.56	6093.22	6100.78	778.33	743.28	733.55	-4.86	0.280	0.529	39.916
7100	7118	10.32	7103.84	7114.16	775.62	752.55	745.82	-3.36	0.150	0.388	26.434
7780	7800	11.09	7784.46	7795.55	769.41	746.08	743.69	-1.19	0.130	0.361	24.520
8460	8500	23.15	8468.43	8491.58	759.33	747.66	741.87	-2.89	0.030	0.173	14.567
9190	9260	41.66	9204.17	9245.83	757.89	746.93	745.28	-0.83	0.009	0.096	11.782

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
1300	1408	63.82	1322.09	1385.91	624.69	609.51	611.39	0.94	0.004	0.063	14.235
2120	2188	38.91	2134.55	2173.46	639.85	599.51	611.86	6.17	0.011	0.103	34.162
3630	3713	48.12	3647.44	3695.56	739.37	674.78	723.25	24.23	0.007	0.083	40.347
4390	4433	24.77	4399.12	4423.89	756.22	700.51	742.69	21.09	0.026	0.161	34.619
5070	5098	16.13	5075.94	5092.07	744.77	709.47	736.65	13.59	0.061	0.248	21.710
5760	5781	28.03	5756.49	5784.52	736.69	713.17	740.13	13.48	0.020	0.143	10.042
6780	6796	9.16	6783.42	6792.58	741.99	749.61	748.52	-0.54	0.191	0.437	-7.069
7420	7434	7.34	7423.33	7430.67	737.47	743.86	745.13	0.64	0.297	0.545	-7.020
8100	8154	30.4	8111.80	8142.20	753.51	738.84	747.26	4.21	0.017	0.132	10.461
8800	8885	48.91	8818.05	8866.96	754.08	744.31	747.93	1.81	0.007	0.082	7.965
9560	9588	16.09	9565.96	9582.05	753.50	743.81	749.94	3.07	0.062	0.249	6.629

• Sensor F2 con 10 cm de carga sentido negativo:

• Sensor F3 con 10 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
900	981	47.84	916.58	964.42	652.83	520.77	563.87	21.55	0.007	0.084	110.515
1710	1823	67.53	1732.74	1800.27	602.91	531.21	571.21	20.00	0.004	0.059	51.700
2510	2575	37.1	2523.95	2561.05	672.58	521.47	573.07	25.80	0.012	0.108	125.311
3250	3287	20.81	3258.10	3278.91	812.85	533.36	625.19	45.91	0.037	0.192	233.573
3960	4020	34.22	3972.89	4007.11	715.13	528.96	598.12	34.58	0.014	0.117	151.591
4670	4727	33.9	4681.55	4715.45	717.06	524.64	597.91	36.63	0.014	0.118	155.789
5420	5509	51.69	5438.66	5490.35	593.64	530.86	582.86	26.00	0.006	0.077	36.781
6150	6182	18.94	6156.53	6175.47	796.52	545.82	640.72	47.45	0.045	0.211	203.253
6820	6869	28.78	6830.11	6858.89	760.61	556.40	628.74	36.17	0.019	0.139	168.042
7500	7530	16.5	7506.75	7523.25	801.75	565.54	651.62	43.04	0.059	0.242	193.177

• Sensor F3 con 10 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
1300	1403	61.87	1320.57	1382.44	546.53	568.97	534.51	-17.23	0.004	0.065	-5.207
2130	2208	44.38	2146.81	2191.19	554.56	572.88	526.72	-23.08	0.008	0.090	4.760
2880	2950	40.15	2894.93	2935.08	567.27	585.05	541.90	-21.58	0.010	0.100	3.795
3600	3655	31.32	3611.84	3643.16	566.36	591.53	532.67	-29.43	0.016	0.128	4.265
4320	4367	26.4	4330.30	4356.70	566.08	586.89	530.80	-28.05	0.023	0.152	7.234
5030	5113	48.09	5047.46	5095.55	559.67	587.59	531.04	-28.27	0.007	0.083	0.353
5810	5845	19.6	5817.70	5837.30	580.23	597.32	550.02	-23.65	0.042	0.204	6.560
6490	6515	14.78	6495.11	6509.89	603.11	616.76	570.56	-23.10	0.073	0.271	9.456
7170	7192	. 12.72	7174.64	7187.36	615.43	618.40	575.46	-21.47	0.099	0.314	18.506
7830	7845	8.47	7833.27	7841.74	627.90	626.95	585.58	-20.69	0.223	0.472	21.630

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
900	991	52.82	919.09	971.91	543.33	530.30	550.90	10.30	0.006	0.076	2.733
1700	1818	66.47	1725.77	1792.24	542.32	524.18	555.91	15.87	0.004	0.060	2.282
2520	2591	40.15	2535.43	2575.58	552.34	529.08	559.39	15.16	0.010	0.100	8.106
3270	3342	41.71	3285.15	3326.86	555.19	530.96	564.38	16.71	0.009	0.096	7.525
4710	4744	19.81	4717.10	4736.91	565.64	535.16	572.00	18.42	0.041	0.202	12.067
5370	5395	14.35	5375.33	5389.68	579.54	540.63	576.60	17.99	0.078	0.279	20.931
6050	6063	7.81	6052.60	6060.41	600.94	542.92	582.83	19.96	0.262	0.512	38.069
6690	6711	12.38	6694.31	6706.69	588.37	548.41	586.27	18.93	0.104	0.323	21.033
7370	7408	21.75	7378.13	7399.88	577.27	547.21	582.14	17.47	0.034	0.184	12.591

• Sensor F4 con 10 cm de carga sentido positivo:

• Sensor F4 con 10 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1300	1384	47.34	1318.33	1365.67	530.16	558.76	520.19	-19.28	0.007	0.084	-9.316
2120	2220	58.75	2140.63	2199.38	536.39	560.19	525.18	-17.51	0.005	0.068	-6.289
2900	2969	39.97	2914.52	2954.49	540.28	563.67	530.23	-16.72	0.010	0.100	-6.673
3650	3705	30.56	3662.22	3692.78	549.46	570.77	540.15	-15.31	0.017	0.131	-5.999
5050	5070	10.87	5054.57	5065.44	538.12	574.26	544.93	-14.67	0.135	0.368	-21.482
5700	5733	18.59	5707.21	5725.80	547.62	574.45	542.77	-15.84	0.046	0.215	-10.984
6370	6384	7.85	6373.08	6380.93	525.94	576.72	546.34	-15.19	0.260	0.510	-35.587
7710	7746	21.06	7717.47	7738.53	557.39	583.22	552.16	-15.53	0.036	0.190	-10.297
4370	4404	18.96	4377.52	4396.48	547.09	573.33	541.74	-15.80	0.045	0.211	-10.450

• Sensor F5 con 10 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	ΔVs
900	974	41.9	916.05	957.95	729.21	721.72	732.69	5.48	0.095	0.009	2.005
1670	1767	56.28	1690.36	1746.64	728.52	724.20	732.22	4.01	0.071	0.005	0.309
2470	2523	29.62	2481.69	2511.31	733.46	726.57	738.74	6.08	0.135	0.018	0.808
3180	3210	17.94	3186.03	3203.97	741.04	730.91	741.45	5.27	0.223	0.050	4.863
3840	3865	14.38	3845.31	3859.69	744.50	737.56	745.14	3.79	0.278	0.077	3.152
4520	4560	24.1	4527.95	4552.05	742.99	736.04	743.73	3.85	0.166	0.028	3.100
5220	5238	10.69	5223.66	5234.35	749.31	733.38	745.95	6.29	0.374	0.140	9.650
5900	5926	36.9	5894.55	5931.45	735.71	732.94	740.82	3.94	0.108	0.012	-1.172
6620	6634	7.94	6623.03	6630.97	747.64	725.84	738.03	6.10	0.504	0.254	15.697
7260	7346	50.09	7277.96	7328.05	734.35	730.13	731.93	0.90	0.080	0.006	3.327

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	∆Vs
1280	1362	49.31	1296.35	1345.66	731.55	734.87	725.20	-4.83	0.081	0.007	1.515
2070	2170	58.16	2090.92	2149.08	728.52	730.95	723.31	-3.82	0.069	0.005	1.384
2830	2876	25.75	2840.13	2865.88	734.22	738.13	730.19	-3.97	0.155	0.024	0.059
3510	3536	14.78	3515.61	3530.39	739.76	746.16	735.33	-5.42	0.271	0.073	-0.991
4170	4219	28.91	4180.05	4208.96	740.20	746.47	735.31	-5.58	0.138	0.019	-0.688
4860	4917	32.94	4872.03	4904.97	738.86	743.91	731.14	-6.38	0.121	0.015	1.337
6270	6320	28.84	6280.58	6309.42	731.29	737.55	725.41	-6.07	0.139	0.019	-0.193
6940	6957	9.66	6943.67	6953.33	729.85	736.78	725.59	-5.60	0.414	0.171	-1.328
7650	7664	7.94	7653.03	7660.97	709.63	735.76	723.62	-6.07	0.504	0.254	-20.052

• Sensor F5 con 10 cm de carga sentido negativo:

• Sensor F6 con 10 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	ΔVs
900	948	28.06	909.97	938.03	700.40	721.77	716.07	-2.85	0.143	0.020	-18.524
1960	2025	38.78	1973.11	2011.89	811.06	806.77	794.01	-6.38	0.103	0.011	10.665
2850	2952	59.58	2871.21	2930.79	833.94	822.39	792.24	-15.07	0.067	0.005	26.623
3590	3668	46.01	3606.00	3652.01	828.00	819.34	796.69	-11.33	0.087	0.008	19.987
4320	4452	77.97	4347.02	4424.99	817.85	821.33	811.14	-5.10	0.051	0.003	1.612
5120	5163	25.53	5128.74	5154.27	805.55	815.05	753.66	-30.70	0.157	0.025	21.197
5810	5849	23.1	5817.95	5841.05	788.89	791.33	781.30	-5.01	0.173	0.030	2.571
6480	6503	13.06	6484.97	6498.03	780.57	776.02	739.68	-18.17	0.306	0.094	22.720
7130	7150	11.09	7134.46	7145.55	715.30	690.15	656.44	-16.86	0.361	0.130	42.006

• Sensor F6 con 10 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	∆Vs
1250	1347	56.41	1270.30	1326.71	761.36	747.42	758.99	5.79	0.071	0.005	8.156
2460	2543	48.03	2477.49	2525.52	818.52	813.87	804.39	-4.74	0.083	0.007	9.387
3260	3286	14.81	3265.60	3280.41	766.15	806.14	803.60	-1.27	0.270	0.073	-38.725
3970	4016	26.62	3979.69	4006.31	800.34	804.81	808.73	1.96	0.150	0.023	-6.435
4760	4813	31.53	4770.74	4802.27	805.73	816.36	806.10	-5.13	0.127	0.016	-5.504
5470	5503	19.22	5476.89	5496.11	755.47	759.32	775.97	8.32	0.208	0.043	-12.175
6150	6171	12.12	6154.44	6166.56	750.57	782.17	760.34	-10.91	0.330	0.109	-20.687
6810	6824	8.25	6812.88	6821.13	636.14	745.81	633.84	-55.99	0.485	0.235	-53.692
7450	7503	32.66	7460.17	7492.83	698.86	668.22	681.92	6.85	0.122	0.015	23.789

Anexo E: Curvas de Calibración para los Sensores Malos.

En la Figuras e-1 y e-2 se muestra la relación del tipo lineal entre la serie de datos asociada a ΔVs (Vs – Vs_o -Vc) v/s u, para cada corrida experimental del sensor SF2 y SF6. En el eje de las ordenadas del gráfico se muestran los datos de variación de voltaje de salida en milivoltios (mV). En las abscisas se muestran los datos de las distintas velocidades del sensor (m/s), que se llevaron a cabo en las corridas experimentales. Se incluyen sus respectivas líneas de tendencia.



Figura e-1. Relación entre la Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF2. (Fuente: Elaboración propia).



Figura e-2. Relación entre la Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF6. (Fuente: Elaboración propia).

Anexo F: Datos Experimentales para obtener ∆Vs para el sensor SF4 a siete alturas de carga distintas.

En la Figura f-1 se muestra la relación entre la serie de datos asociada a $\Delta Vs (Vs - Vs_o - Vc) v/s u$, para cada corrida experimental del sensor SF4 a siete alturas de carga diferentes. Se incluyen sus respectivas líneas de tendencia



Figura f-1. Variación de voltaje de salida y la velocidad del sensor, para ambos sentidos juntos del sensor SF4. (Fuente: Elaboración propia).

 Sensor F4 con 2 cm de carga sentido positivo:
Tiempo inicial Tiempo final Tiempo medido T medido i T medido f Vs Vso Vp Vc 1660 1694 19.53 1667.24 1686.77 398.14 411.41 377.46 -16.98

inempe interai	inempe intai	nempeniearae	THEGANAOT	1111041401	00		-			•()•]	
1660	1694	19.53	1667.24	1686.77	398.14	411.41	377.46	-16.98	0.042	0.205	3.709
2350	2388	22.12	2357.94	2380.06	391.51	408.18	372.45	-17.86	0.033	0.181	1.200
3030	3058	16	3036.00	3052.00	394.34	404.70	375.86	-14.42	0.063	0.250	4.065
3690	3709	11.15	3693.93	3705.08	398.73	401.29	375.93	-12.68	0.129	0.359	10.117
4340	4353	7.78	4342.61	4350.39	408.51	414.79	380.42	-17.19	0.264	0.514	10.903

• Sensor F4 con 2 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVS
2000	2042	25.22	2008.39	2033.61	385.10	399.43	385.56	-6.94	0.025	0.159	-7.392
2690	2722	18.59	2696.71	2715.30	384.40	400.59	385.04	-7.78	0.046	0.215	-8.420
3360	3388	15.53	3366.24	3381.77	381.53	397.61	381.33	-8.14	0.066	0.258	-7.936
4010	4032	12.9	4014.55	4027.45	383.48	401.22	393.12	-4.05	0.096	0.310	-13.685
4660	4673	7.97	4662.52	4670.49	373.88	409.78	400.72	-4.53	0.252	0.502	-31.364

u(m/s)

۸۱/۵

11²(m/s)

• Sensor F4 con 5 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
950	998	28.19	959.91	988.10	527.64	540.38	539.19	-0.60	0.020	0.142	-12.145
1650	1692	24.6	1658.70	1683.30	533.39	530.65	522.93	-3.86	0.026	0.163	6.597
2340	2367	16.09	2345.46	2361.55	536.46	525.53	518.63	-3.45	0.062	0.249	14.376
3000	3021	12.13	3004.44	3016.57	547.24	519.81	525.68	2.93	0.109	0.330	24.501
3660	3674	7.96	3663.02	3670.98	551.52	519.41	524.39	2.49	0.253	0.503	29.627

• Sensor F4 con 5 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1300	1348	27.72	1310.14	1337.86	531.22	552.51	518.43	-34.08	0.021	0.144	12.791
2000	2038	22.19	2007.91	2030.10	529.49	545.79	519.76	-26.03	0.032	0.180	9.729
2670	2694	13.94	2675.03	2688.97	513.40	538.10	511.39	-26.72	0.082	0.287	2.010
3330	3358	16.46	3335.77	3352.23	515.16	544.44	511.20	-33.25	0.059	0.243	3.967
3960	3974	8.32	3962.84	3971.16	486.43	537.99	502.99	-35.01	0.231	0.481	-16.558

• Sensor F4 con 7.5 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
900	999	58.46	920.27	978.73	499.11	477.21	499.61	11.20	0.005	0.068	10.697
1700	1755	30.09	1712.46	1742.55	543.58	510.16	533.96	11.90	0.018	0.133	21.519
2420	2458	21.5	2428.25	2449.75	566.92	524.77	551.52	13.38	0.035	0.186	28.778
3110	3138	16.44	3115.78	3132.22	584.22	536.78	563.90	13.56	0.059	0.243	33.884
3770	3791	12	3774.50	3786.50	600.96	542.63	571.63	14.50	0.111	0.333	43.833

• Sensor F4 con 7.5 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
1300	1394	54.6	1319.70	1374.30	513.19	512.57	503.70	-4.44	0.005	0.073	5.057
2060	2119	33.41	2072.80	2106.21	535.71	539.71	524.70	-7.50	0.014	0.120	3.506
2760	2802	24.25	2768.88	2793.13	549.11	552.14	539.97	-6.09	0.027	0.165	3.052
3440	3467	15.41	3445.80	3461.21	544.73	561.28	541.99	-9.65	0.067	0.260	-6.910
4100	4118	10.1	4103.95	4114.05	550.68	568.89	553.38	-7.76	0.157	0.396	-10.454

• Sensor F4 con 10 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
900	936	21.44	907.28	928.72	413.23	397.72	432.59	17.43	0.035	0.187	-1.924
1580	1605	14.75	1585.13	1599.88	408.61	384.90	421.89	18.49	0.074	0.271	5.217
2230	2285	32.47	2241.27	2273.74	411.51	393.20	427.26	17.03	0.015	0.123	1.276
2940	2955	8.81	2943.10	2951.91	436.64	396.74	433.09	18.17	0.206	0.454	21.729
3580	3592	7.07	3582.47	3589.54	456.33	402.84	438.07	17.62	0.320	0.566	35.881

• Sensor F4 con 10 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	∆Vs
1240	1276	20.35	1247.83	1268.18	391.14	440.93	388.16	-26.38	0.039	0.197	-23.402
1900	1923	13.12	1904.94	1918.06	377.14	435.97	388.59	-23.69	0.093	0.305	-35.146
2590	2636	26.62	2599.69	2626.31	399.35	435.42	392.79	-21.32	0.023	0.150	-14.752
3260	3276	9.38	3263.31	3272.69	364.20	444.10	395.44	-24.33	0.182	0.426	-55.575
3890	3902	7.03	3892.49	3899.52	344.73	442.30	387.79	-27.26	0.324	0.569	-70.311

• Sensor F4 con 12.5 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
900	977	47.57	914.72	962.29	545.81	515.39	539.97	12.29	0.007	0.084	18.132
1660	1735	44.34	1675.33	1719.67	556.71	526.39	554.61	14.11	0.008	0.090	16.213
3840	3873	19.31	3846.85	3866.16	601.75	549.20	587.85	19.33	0.043	0.207	33.224
4520	4542	12.63	4524.69	4537.32	616.44	549.84	592.81	21.49	0.100	0.317	45.115
5180	5199	10.94	5184.03	5194.97	627.27	550.92	595.23	22.16	0.134	0.366	54.192

• Sensor F4 con 12.5 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1280	1359	46.28	1296.36	1342.64	533.32	542.99	524.51	-9.24	0.007	0.086	-0.426
2040	2103	37.28	2052.86	2090.14	544.20	554.58	535.74	-9.42	0.012	0.107	-0.959
2780	2818	22.4	2787.80	2810.20	551.96	566.60	545.97	-10.31	0.032	0.179	-4.321
4180	4214	19.38	4187.31	4206.69	561.82	578.43	555.53	-11.45	0.043	0.206	-5.163
4850	4873	13.1	4854.95	4868.05	552.29	577.21	556.60	-10.30	0.093	0.305	-14.620

• Sensor F4 con 15 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	∆Vs
900	952	30.85	910.58	941.43	446.24	416.01	454.48	19.23	0.130	0.017	10.994
1600	1636	21.5	1607.25	1628.75	444.42	407.55	444.48	18.46	0.186	0.035	18.404
2300	2323	13.63	2304.69	2318.32	444.80	406.84	446.43	19.79	0.293	0.086	18.171
2950	2978	16.62	2955.69	2972.31	430.41	394.98	437.04	21.03	0.241	0.058	14.406
3600	3612	6.79	3602.61	3609.40	461.40	391.95	434.17	21.11	0.589	0.347	48.343

• Sensor F4 con 15 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	Tiempo mi	Tiempo mf	Vs	Vso	Vp	Vc	u(m/s)	u²(m/s)	ΔVs
1250	1299	29	1260.00	1289.00	421.95	452.63	414.84	-18.89	0.138	0.019	-11.788
1950	1991	23.28	1958.86	1982.14	406.88	445.08	401.29	-21.89	0.172	0.030	-16.304
2630	2651	11.94	2634.53	2646.47	391.40	448.82	401.23	-23.80	0.335	0.112	-33.620
3280	3306	14.91	3285.55	3300.46	392.20	444.40	394.91	-24.74	0.268	0.072	-27.450
3900	3913	7.22	3902.89	3910.11	351.52	438.27	388.94	-24.66	0.554	0.307	-62.088

• Sensor F4 con 17.5 cm de carga sentido positivo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1590	1639	29.29	1599.86	1629.15	425.92	383.40	419.65	18.13	0.019	0.137	24.396
2280	2311	18.75	2286.13	2304.88	435.11	386.48	423.54	18.53	0.046	0.213	30.092
3600	3621	12.47	3604.27	3616.74	463.12	391.01	450.23	29.61	0.103	0.321	42.504
4250	4264	8.09	4252.96	4261.05	511.38	399.70	458.24	29.27	0.244	0.494	82.409
2940	2971	18.31	2946.35	2964.66	433.33	384.57	426.44	20.94	0.048	0.218	27.824

• Sensor F4 con 17.5 cm de carga sentido negativo:

Tiempo inicial	Tiempo final	Tiempo medido	T medido i	T medido f	Vs	Vso	Vp	Vc	u²(m/s)	u(m/s)	ΔVs
1240	1286	27.87	1249.07	1276.94	413.20	404.01	396.17	-3.92	0.021	0.144	13.104
1940	1979	23.65	1947.68	1971.33	413.11	418.71	398.17	-10.27	0.029	0.169	4.674
2610	2636	15.6	2615.20	2630.80	390.49	417.38	397.16	-10.11	0.066	0.256	-16.778
3920	3943	13.31	3924.85	3938.16	408.12	445.77	408.13	-18.82	0.090	0.301	-18.826
4570	4584	8.37	4572.82	4581.19	388.35	447.94	414.21	-16.87	0.228	0.478	-42.724

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile