

# Sistema Modular de Adquisición de Presiones

## Modular Pressure Acquisition System

Presentación: 06/09/2023

### **Fabio Darío Marano**

Grupo de Mecánica de Fluidos - Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo – París 532 – Bs As - Argentina  
[fmarano@frh.utn.edu.ar](mailto:fmarano@frh.utn.edu.ar)

### **Pablo Martín Aguilar**

Grupo de Mecánica de Fluidos - Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo – París 532 – Bs As - Argentina  
[paguilar@frh.utn.edu.ar](mailto:paguilar@frh.utn.edu.ar)

### **Nicolás Guillermo Coppolecchia**

Grupo de Mecánica de Fluidos - Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo – París 532 – Bs As - Argentina  
[ncoppolecchia@frh.utn.edu.ar](mailto:ncoppolecchia@frh.utn.edu.ar)

### **Pablo Alfredo Caron**

Grupo de Mecánica de Fluidos - Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo – París 532 – Bs As - Argentina  
[pcaron@frh.utn.edu.ar](mailto:pcaron@frh.utn.edu.ar)

### **Resumen**

El objetivo de este trabajo es desarrollar y construir un dispositivo de adquisición de presiones para medición en túnel de viento basado en módulos de sensores interconectables.

La arquitectura del sistema brinda flexibilidad para la medición, ofreciendo múltiples canales y rangos de presión requeridos según la necesidad de cada ensayo. El trabajo describe el diseño, construcción y prueba de los distintos módulos que conforman el sistema.

**Palabras clave:** Presión, Medición, Túnel de Viento, Módulo

### **Abstract**

The objective of this work is to develop and build a pressure acquisition device for measurement in a wind tunnel based on interconnectable sensor modules.

The system architecture provides flexibility for the measurement, offering multiple channels and pressure ranges required according to the needs of each test.

The work describes the design, construction and testing of the different modules that make up the system.

**Keywords:** Pressure, Measure, Wind Tunnel, Modular

## Introducción

Los sistemas de adquisición de presión en túneles de viento son fundamentales para el estudio de cargas aerodinámicas, ya que permiten obtener las componentes de fuerzas de sustentación, resistencia, y momento del modelo bajo estudio.

La medición de la presión también se utiliza para obtener la distribución de presiones sobre un objeto, lo que ayuda a comprender cómo interactúa el flujo con el mismo.

Por otro lado, las sondas de velocidad (sonda multiagujero o tubos pitot) utilizan sensores de presión para calcular la velocidad, lo que a su vez permite analizar la distribución y calidad del flujo de un túnel de viento.

Dependiendo de la naturaleza de la medición realizada en el túnel, los rangos de presión que se tienen que medir cambian drásticamente. Por ejemplo, al ensayar un modelo de un perfil alar se pueden los valores de presión que se pueden predecir dependen del ángulo de ataque. La variación en el ángulo de ataque conlleva a que las presiones que se tienen que medir varíen mucho. Para resolver esto se utilizan sensores con un rango dinámico que satisfaga esa amplitud sin sufrir saturación en detrimento de la resolución para los valores más bajos de presión. El mismo caso se puede dar en el proceso de calibración de sondas direccionales.

En el caso de la medición de corriente libre de un túnel para la caracterización de flujo, además del valor de presión, toma protagonismo el tiempo de adquisición para detectar pequeñas fluctuaciones armónicas.

Se plantea como concepto de diseño el desarrollo de un array de medición escalable con un conversor analógico-digital de 16 bits integrado que permite la comunicación por protocolo I<sup>2</sup>C estándar. De esta forma la recolección de datos se podrá realizar con cualquier plataforma de adquisición elegida por el usuario.

Se desarrolló un medio de adquisición de datos de medición para luego post procesarlos con una plataforma acorde a la complejidad de la medición

De esta forma dejamos la arquitectura de medición abierta para que el usuario elija con que placa de adquisición quiere trabajar (Arduino, Raspberry, adquisición propietaria, etc..) y procesar los resultados a través de Excel, Python, etc.

Cada array consta de 3 sensores de presión, cada uno conectado a un canal del conversor analógico -digital. También se mide la tensión de alimentación de cada array de sensores para convertir tensión en presión en el post procesamiento.

Cada módulo es escalable hasta 4 arrays por bus I<sup>2</sup>C dando la posibilidad de tener 12 sensores por puerto.

De esta manera es posible combinar arrays de sensores de distinto rango en el mismo bus y conectarlos según la aplicación a medir, dando flexibilidad y una mejor resolución en los rangos de baja presión.

## Desarrollo

- Análisis de Sensor

El primer paso en el diseño del sistema de adquisición es analizar los sensores de presión presentes en el mercado y ponderarlos en función de disponibilidad de stock, precio, rango y precisión.

Como resultado del análisis se destacaron los siguientes sensores con transductor piezoeléctrico de presión diferencial:

Número de Parte	Fabricante	Rango [Pa]	Error [%]
MPXV5004DP	Freescle	3920	2,5
HSCDRR001NDAA3	Honeywell	500	0,25
HSCMR004NDAA5	Honeywell	1000	0,25

Tabla 1: Sensores analizados

Con estos sensores se cubren los rangos de medición necesarios sin perder resolución o acercarse a la banda de error al medir. Debido a contar con stock disponible del sensor MPXV5004DP por haber sido utilizado en el Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos en otros dispositivos, la primera versión del array se diseñó con este sensor.

La tensión de salida es proporcional a la diferencia de presión a la entrada según la siguiente transferencia (Freescle Semiconductor, Technical Data, 2015)

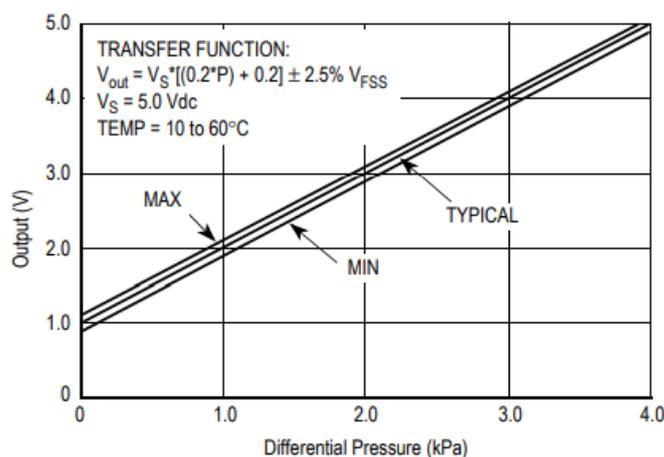


Figura 1: Transferencia de salida

Esta transferencia es válida si se toma el estado de presión diferencial cero y se utiliza como *auto cero* del sistema. Esto permite mantener el error a  $\pm 1.5\% \text{ FSS}$  (Full Scale Span) en valores menores a 1kPa y  $\pm 2.5\% \text{ FSS}$  en valores entre 1kPa y 4kPa teniendo en cuenta el proceso de auto cero (Freescle Semiconductor, Application Note AN1636, 2007).

Dado que el fondo de escala a utilizar es 1kPa, el error de clase declarado por el fabricante será  $\pm 15\text{Pa}$

Para calcular el valor de presión en función de la tensión de salida ( $V_{out}$ ) debemos despejar de la transferencia la variable P dando lugar a la ecuación 1:

$$P = \frac{V_{OUT}}{0.2V_S} - 1$$

Ecuación 1: Presión en función de tensión

De esta forma se puede observar que  $V_S$  (alimentación del sensor) forma parte de la transferencia y queda claro que no es válido suponer su valor constante durante todo el proceso de medición.

Por este motivo además de medir el valor de tensión entregado por el sensor al ser sometido a una presión de entrada se registrará el valor de alimentación del sensor.

- Elección de Conversor Analógico Digital (ADC)

Como criterio de elección se analizó disponibilidad, resolución, velocidad, cantidad de canales e interfaz de comunicación.

Se eligió el ADS1115 de Texas Instruments que tiene las siguientes características (Texas Instrument, Technical Data, 2018):

- sigma-delta de 16bits
- 4 canales
- 860sps
- Amplificador de ganancia programable (PGA) configurable por software
- referencia de tensión interna
- Comunicación I<sup>2</sup>C

El PGA permite configurar el valor de fondo de escala con el que vamos a trabajar y esto define el mínimo valor de tensión por cuenta de conversor. Al trabajar con 4.096V el valor del bit menos significativo (LSB) será de 125uV. Esto representaría 0.125Pa para la transferencia del sensor elegido, si el margen de error los permitiera.

Para alcanzar los requerimientos de impedancia de carga y filtrado necesarios por el conversor analógico digital se incorpora un amplificador operacional en configuración *buffer* y un filtro pasa bajos de primer orden por cada canal.

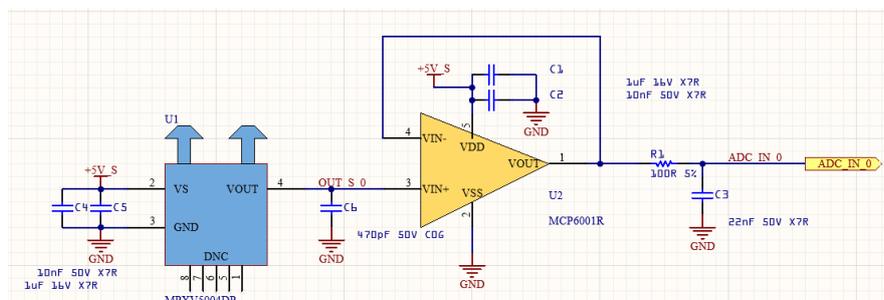


Figura 2: Sensor y adaptación de señal por cada canal

Se define una tensión de bus I<sup>2</sup>C de 3.3V para conectar a dispositivos adquirentes, aunque la alimentación principal de cada array es 5V.

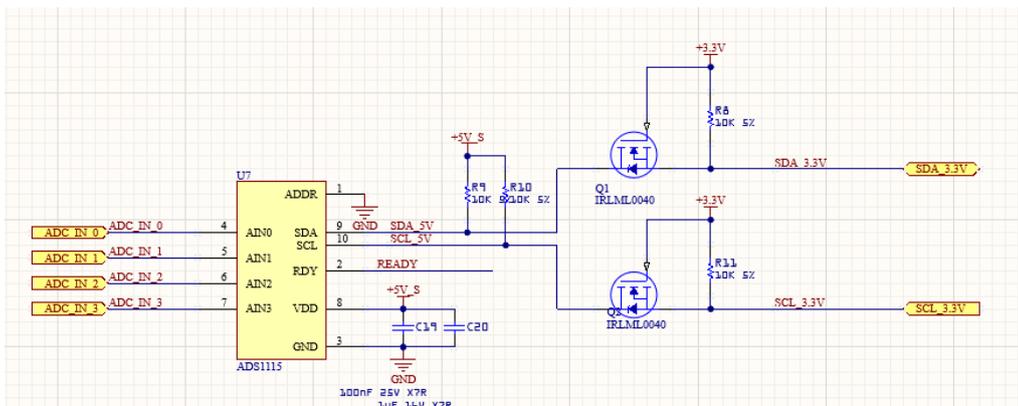


Figura 3: Adaptación de nivel para bus I<sup>2</sup>C

- Diseño de Circuito Impreso

Se diseñó un circuito impreso doble faz a través del software de diseño asistido por computadora Altium Designer. La estrategia elegida fue diseñar un único array interconectable sobre el mismo bus. Cada array tiene una dirección seteada por hardware utilizando resistores fijos para dar valor a dicha dirección.

Se optimizaron las medidas del circuito impreso para ocupar la menor superficie posible y que permita la conexión con los otros arrays, las dimensiones finales son: 100mm x 50mm.

Se siguieron las recomendaciones de diseño presentes en la hoja de datos del convertor ADS1115 en cuanto a cuidado de señales analógicas, tensión de alimentación y planos de referencia (Texas Instrument, Technical Data, 2018, p.41-42).

Los encapsulados de los componentes fueron adoptados en tecnología de montaje superficial.

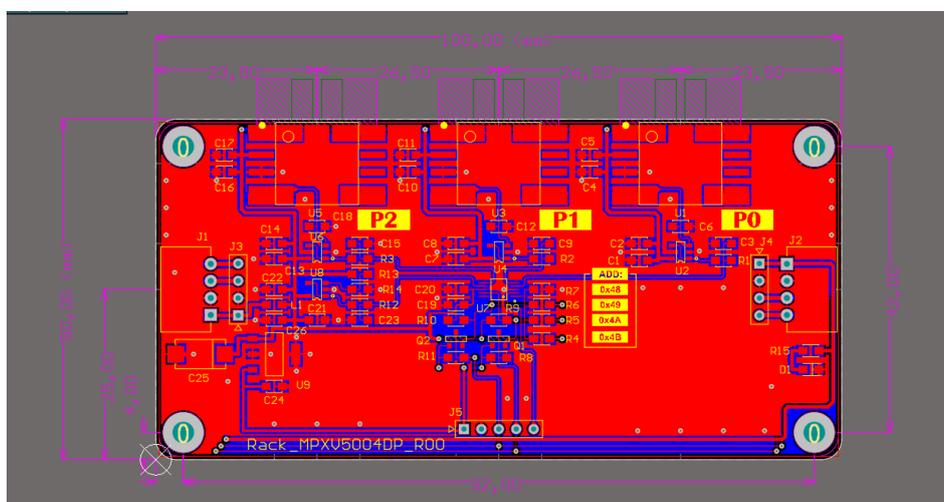


Figura 3: Circuito Impreso en 2D

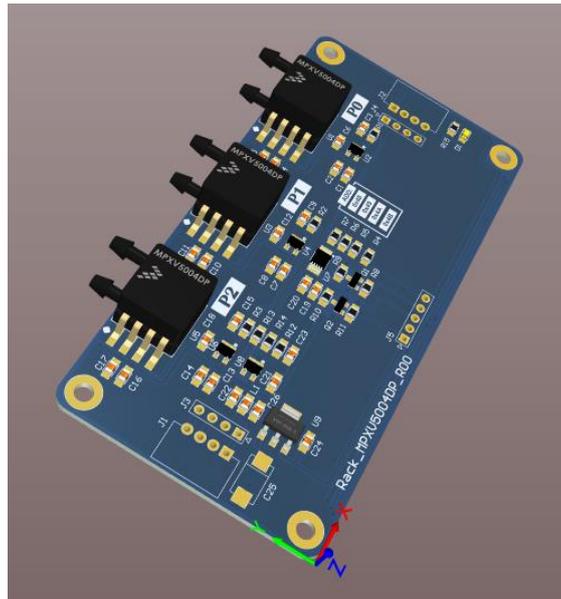


Figura 4: Circuito Impreso en 3D

- Construcción de Prototipo funcional

Se construyó un rack de 9 sensores, es decir, 3 placas de 3 sensores en paralelo.

El armado de cada placa se hizo de forma manual utilizando herramientas específicas para la tarea.

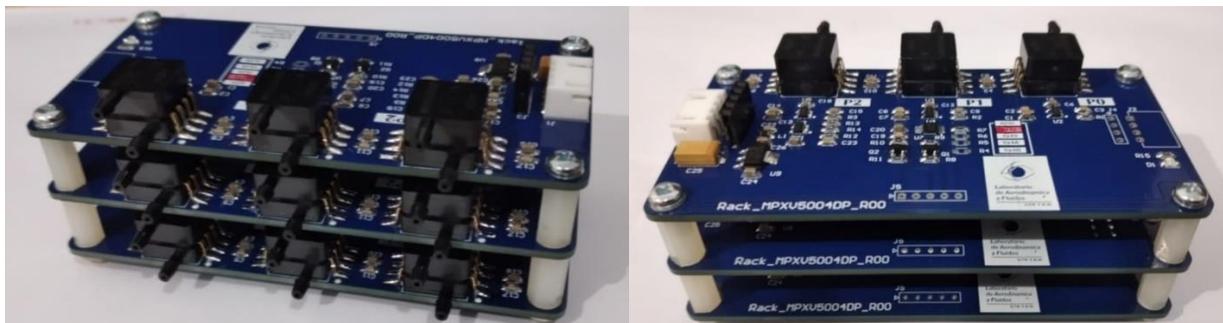


Figura 5: Circuito Impreso montado

- Plataforma de Adquisición

Se utilizó como dispositivo de adquisición una placa de desarrollo NUCLEO-F401 de marca ST Microelectronics (ST Microelectronics, User Manual UM1724, 2020).

La misma cuenta con un microcontrolador de 32bits – STM32F401RE, 84Mhz de frecuencia de clock, 3 buses de comunicación I<sup>2</sup>C (ST Microelectronics, STM32F401).

Se desarrolló un software *ad hoc* para el uso del ADC por I<sup>2</sup>C en lenguaje C, implementando además, una aplicación que permite recibir comandos por el puerto serie y devolver los valores medidos, facilitando así su empleo para el usuario final.

Para desarrollar este software se utilizó el entorno STM32Cube IDE (ST Microelectronics, STM32Cube IDE) por simplicidad y corto tiempo de desarrollo en función de la capacidad de los integrantes del laboratorio, pero podría haberse utilizado cualquier dispositivo con I<sup>2</sup>C. Por ejemplo, Arduino.

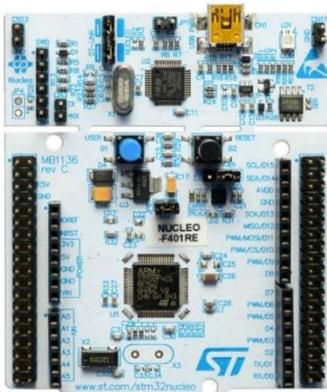


Figura 6: Placa Núcleo 401

Se desarrolló un software en C# que permite operar la placa de adquisición y guardar los datos en archivos para su post procesamiento. Este software permite: seleccionar el o los sensores para operar, definir la cantidad de muestras a tomar por sensor, y administrar el comienzo y fin de la medición.

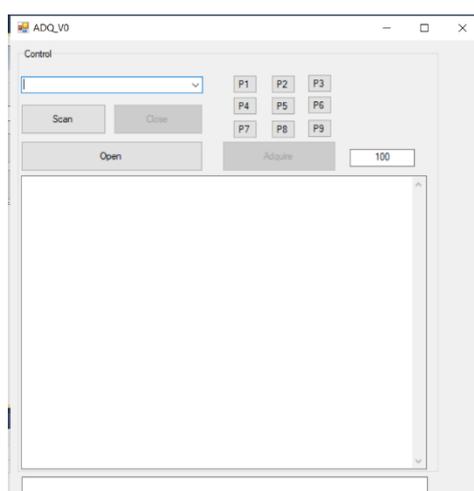


Figura 7: Panel de Control para adquisición

El resultado de cada medición se guardará en un archivo CSV que contará con el valor de tensión detectado por cada sensor y el valor de alimentación de dicho sensor.

## Resultados

Una vez montados los componentes sobre cada circuito impreso, se realizaron mediciones preliminares de tensión y corriente en puntos específicos del circuito para validar el ensamble.

Se realizaron mediciones en uno de los túneles de viento con los que cuenta el laboratorio y se compararon los valores obtenidos con el instrumento Fluke-922 (Fluke, Medidor del caudal de aire/micromanómetro Fluke 922 ) que se utiliza como referencia en cada ensayo.

El rango de análisis realizado fue de  $\pm 800$ Pa y el número de muestras del módulo de sensores fue de 100 por canal.

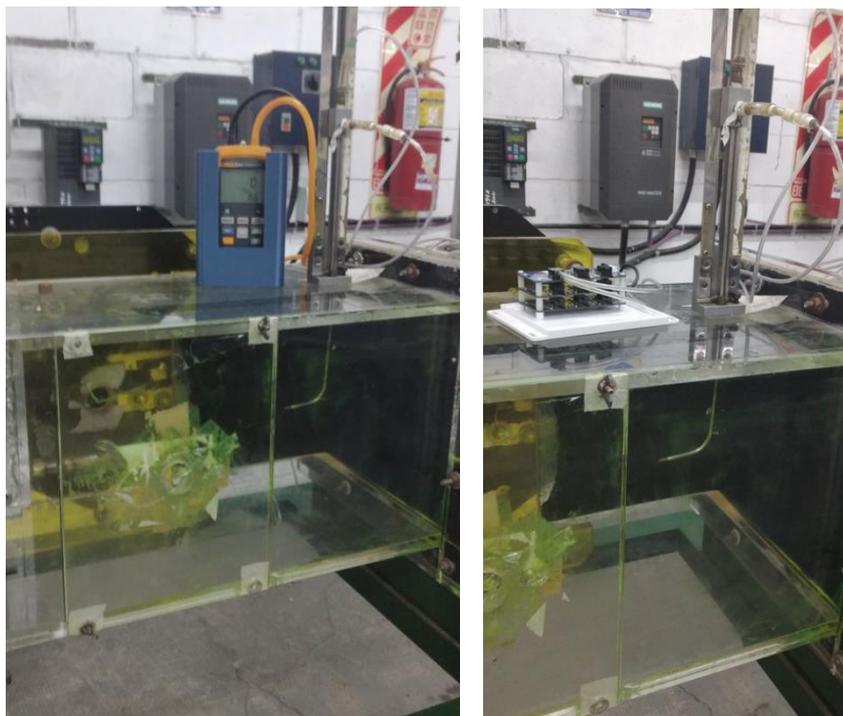


Figura 8: Montaje de instrumentos a comparar en túnel de viento

Se realizó una comparación de los datos procesados de las presiones obtenidas por el módulo de medición y los valores de presión del Fluke. Para esto se generaron las siguientes salidas de datos:

- Tablas con los datos de cada canal de presión con su estimado e incertidumbre en Pascales y en forma porcentual, el valor estimado del Fluke 922 y la diferencia entre estos instrumentos en Pascales y en forma porcentual absoluta.
- Gráfico con la comparación entre los valores del Fluke 922 y los obtenidos por cada toma de presión junto con la curva de regresión lineal para determinar el paralelismo de lectura entre ambos.

Datos de entrada			Análisis		
SAPY (Toma 1)			Fluke 922	Comparación	
Valor Estimado [Pa]	Incertidumbre estándar expandida (95%) [Pa]	Incertidumbre relativa [%]	Valor Estimado [Pa]	Diferencia entre instrumentos [Pa]	Diferencia porcentual [%]
-795.58	12.06	1.52%	-801	5.42	0.68%
-602.06	9.41	1.56%	-601	-1.06	0.18%
-501.37	7.97	1.59%	-501	-0.37	0.07%
-401.82	6.43	1.60%	-401	-0.82	0.20%
-301.65	4.72	1.56%	-301	-0.65	0.22%
-199.31	3.09	1.55%	-201	1.69	0.84%
-100.16	1.73	1.73%	-100	-0.16	0.16%
-50.34	0.93	1.85%	-50	-0.34	0.68%
0.00	0.08		0	0.00	
0.99	0.11		0	0.99	
50.09	1.11	2.22%	50	0.09	0.18%
100.86	1.94	1.93%	100	0.86	0.86%
201.04	3.90	1.94%	201	0.04	0.02%
302.00	5.55	1.84%	301	1.00	0.33%
402.39	7.65	1.90%	401	1.39	0.35%
504.14	9.52	1.89%	501	3.14	0.63%
603.51	11.13	1.84%	601	2.51	0.42%
797.21	14.75	1.85%	801	-3.79	0.47%

Tabla 2: Resultados comparativos

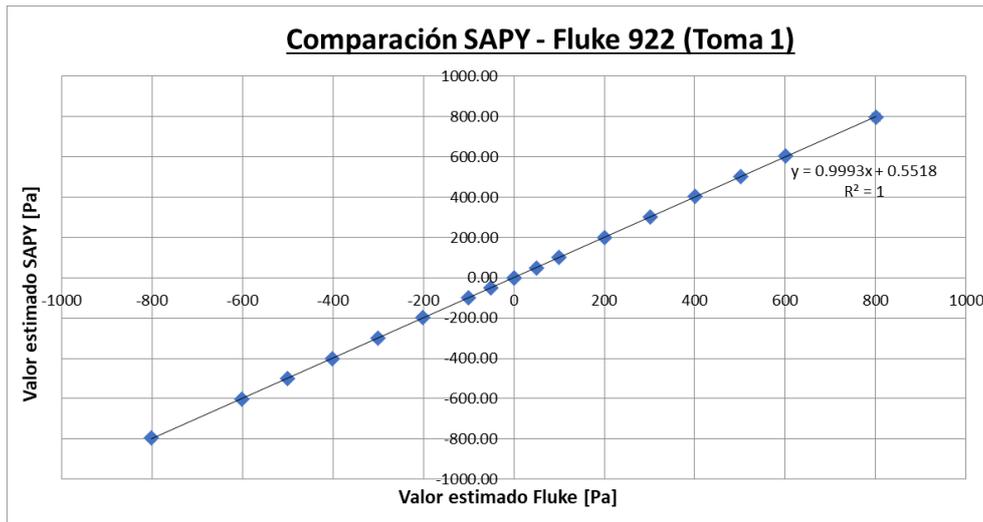


Figura 9: Gráfico comparativo

Este análisis se realizó por cada sensor del módulo de adquisición de presiones.

Por lo observado, el sistema modular de presiones presenta una diferencia porcentual de sus valores con respecto al Fluke 922 menor al 3%. Las mayores diferencias encontradas se dieron a bajas presiones ya que los sensores utilizados no son muy precisos en ese rango. Los valores de incertidumbre obtenidos en todas las tomas se mantuvieron por debajo del 2% promedio, por lo que el instrumento presenta valores muy bajos de incertidumbre en las mediciones. No se observaron valores de corrimiento del cero presiones importantes durante el ensayo.

## Conclusiones

El sistema modular de adquisición de presiones desarrollado fue ensayado junto con el Fluke 922 para determinar sus diferencias de medición y comprobar su funcionamiento para el uso en ensayos en su etapa inicial de desarrollo. Para esto se diseñó un ensayo donde ambos instrumentos debían medir la misma presión de una toma estática del túnel de viento. Luego se procesaron los datos de salida para obtener las presiones junto con sus incertidumbres y finalmente se organizó los datos en una serie de tablas y gráficos para su comparación con el Fluke 922.

Por lo observado en los resultados se determinó que las diferencias entre los valores de las mediciones son menores al 3%. Dentro de estos valores, los más cercanos al 3% corresponden a los que están cerca de cero debido a la baja precisión de los sensores del instrumento en ese rango. También se observó una baja incertidumbre en las mediciones inferior al 2% en promedio en todas sus tomas. Estos resultados se encuentran limitados para el rango de presiones ( $\pm 800$ Pa) debido a la capacidad de generar mayores presiones con el túnel durante el ensayo.

Se concluyó finalmente que el sistema modular de adquisición de presiones es apto para su uso en ensayos de túnel y no requiere ningún coeficiente de ajuste a sus mediciones. Esto es válido siempre que se considere al Fluke 922 como un instrumento patrón calibrado y los valores de presión medidos durante un ensayo no se encuentren cercanos al cero presiones.

Para rangos de presión más bajos se necesitarán construir los arrays utilizando sensores con un fondo de escala y error acorde.

## Referencias

Fluke, Medidor del caudal de aire/micromanómetro Fluke 922

<https://www.fluke.com/es-ar/producto/infraestructura-del-edificio/pruebas-de-calidad-del-aire-en-interiores/fluke-922>

Freescale Semiconductor, Application Note AN1636 (2007)

Implementing Auto-Zero for Integrated Pressure Sensors

<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXV5004G.pdf>

Freescale Semiconductor, Technical Data (2015)

MPxx5004, 0 to 3.92 kPa, Differential and Gauge, Integrated Pressure Sensor

<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXV5004G.pdf>

ST Microelectronics, STM32Cube IDE

<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

ST Microelectronics, STM32F401

<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401.html>

ST Microelectronics, User Manual UM1724 (2020)

STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)

[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf)

Texas Instrument, Technical Data (2018)

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I<sup>2</sup>C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>