



Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

FACULTAD DE INGENIERÍA

AUTOMATIZACIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

*Proyecto Fin de Carrera
- Ingeniería Electrónica -*

Autores:

Caamiña Quineros, Daniela Beatriz
Yapura, Cristian Alejandro

Diciembre 2021

Agradecimientos

Agradecimientos Agradecimientos Agradecimientos Agradecimientos
Agradecimientos Agradecimientos Agradecimientos Agradecimientos

Agradecimientos2 Agradecimientos2 Agradecimientos2 Agradecimientos2
Agradecimientos2 Agradecimientos2 Agradecimientos2 Agradecimientos2

...la foto del recuerdo



Autores realizando el proyecto final de carrera en contexto de "Pandemia" por *Covid-19*.

Índice

1. Introducción	6
2. Objetivo	7
3. Túnel Aerodinámico	8
3.1. Clasificación	8
3.2. Túnel UNPSJB	8
3.2.1. Historia	8
3.2.2. Motor y Variador de velocidad	9
3.2.3. Instrumentación	10
4. Fluido- Aire	11
4.1. Ecuación velocidad del aire	11
4.2. Características del flujo	11
4.2.1. Estimación del número de Reynolds	12
4.2.2. Flujo turbulento	13
5. Desarrollo	15
5.1. Microcontrolador, sensores y comunicación	15
5.2. Adquisición de datos por puerto serie	16
5.3. Filtros	17
5.4. Error observado	17
5.5. Estimación de la planta	20
5.5.1. Diagrama de trabajo	20
5.5.2. Método de estimación	21
5.6. Control	23
6. Pruebas realizadas	24
6.1. Comparación de densidades	24
6.2. Fluctuaciones de velocidad	25
6.3. Estimación de la densidad ante cambios de Temperatura y Humedad	26
6.4. comparación de la frecuencia vista en el panel con el valor de PWM	28
6.5. Contrastación de diferencia de presión	28
6.6. Contrastación de velocidades	28
6.7. Perturbaciones	28
7. Implementación	31
7.1. Bloque Aplicación	31
7.2. Bloque Hardware	34
7.3. Costos	35
7.4. Consumo de corriente	35
7.5. Planos eléctricos	35
8. Recomendaciones futuras	36
9. Conclusión	37
10.Bibliografia	38

Índice de figuras

2.1. Diagrama del objetivo	7
3.1. Tunel vertical de uso recreativo	8
3.2. Clasificación túneles	8
3.3. Tunel UNPSJB	9
3.4. Motor y variador de velocidad	10
3.5. Instrumentación calibrada	11
4.1. Diámetro hidráulico	12
4.2. Dimensiones de la cámara de ensayos en mm	13
4.3. Perforaciones dentro de la cámara de ensayos y "Panal de abeja"	13
4.4. Fluctuaciones	14
5.1. Sensores utilizados	16
5.2. Pantalla Processing	17
5.3. Datos y diversos filtros	18
5.4. Datos y filtro mediana	19
5.5. Curva aceleración y desaceleración	19
5.6. Placa de control	20
5.7. Terminales de control	20
5.8. Placa adaptadora de señal	21
5.9. Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta	21
5.10. Diagrama en bloques	21
5.11. Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados	22
5.12. Estimación de planta	22
5.13. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 1	23
5.14. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2	24
5.15. Ejemplo de prueba realizada	25
5.16. Comparación de PI, escalon de subida	25
5.17. Comparación de PI, escalon de bajada	26
5.18. Comparación 3 sistemas PI	26
6.1. Esquema de placa con sensores utilizados	27
6.2. Fluctuaciones en velocidades medidas	27
6.3. Contrastación de diferencia de presión	29
6.4. Compuertas utilizadas como perturbaciones	29
6.5. Fotos del reóstato (izquierda) y del banco de resistencias (derecha)	31
6.6. VER QUE POINER	32
6.7. VER QUE POINER okkkk	32
7.1. Bloques implementados	33
7.2. Bloque Aplicación	33
7.3. Diagrama en bloques del hardware	35

Índice de tablas

5.1. Factor de escala	16
5.2. Valores de PID's	24
6.1. Comparación de densidades calculadas	27
6.2. Densidad del aire ante cambios de TH	28
6.3. del aire ante cambios de TH	28
6.4. Comparación de Diferencia de presión	30
7.1. Gastos de implementación	39

1. Introducción

En el Laboratorio de Fluidos de la Universidad, se utiliza el Túnel de Viento para realizar el contraste de anemómetros y experimentos para distintas materias. Gran parte de estas aplicaciones requieren que se conozca la velocidad del fluido (aire). Por lo tanto, variación de presión, humedad, presión atmosférica y temperatura son variables requeridas para lograr estimarla con mayor precisión. Cada variable debe ser medida de forma manual con sus respectivos instrumentos para luego ingresar estos valores a una tabla (generada de forma estadística) y obtener una estimación de la velocidad del fluido.

El túnel en sus comienzos, para realizar distintas mediciones, utilizaba un control de velocidad a lazo abierto en el que se modificaba la resistencia del motor, cambiando la velocidad del aire en pasos discretos. Actualmente, desde principios del año 2020 se utiliza un variador de velocidad de la marca **Long Shenq**, con él se obtiene un control mas continuo en la frecuencia del motor.

Realizar este proceso de forma manual, se torna engorroso y poco práctico para la realización de varias mediciones por lo que se realiza este trabajo final de carrera para realizar la *Automatización del Túnel de Viento de la UNPSJB*.

2. Objetivo

El objetivo de este proyecto es generar un lazo de control que tenga como entrada la velocidad de referencia, y que contemple las perturbaciones externas del sistema en el cálculo de la velocidad de salida que se utilizará como lazo de realimentación (Figura 2.1). Para esto es necesario adaptar la acción de control que se será la entrada de referencia para indicar la frecuencia de salida del variador de velocidad. Además se espera realizar una interfaz gráfica para un mejor manejo y control del sistema.

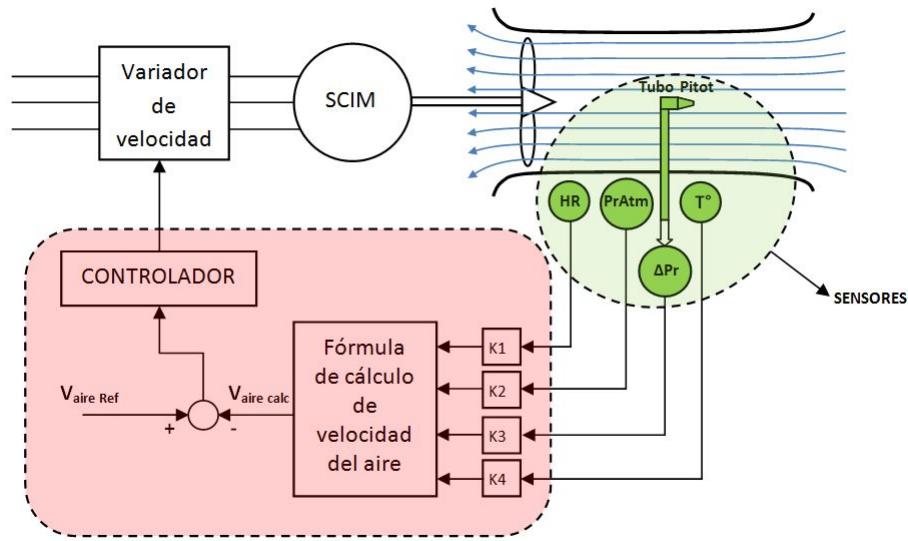


Figura 2.1: Diagrama del objetivo

3. Túnel Aerodinámico

Túnel de viento

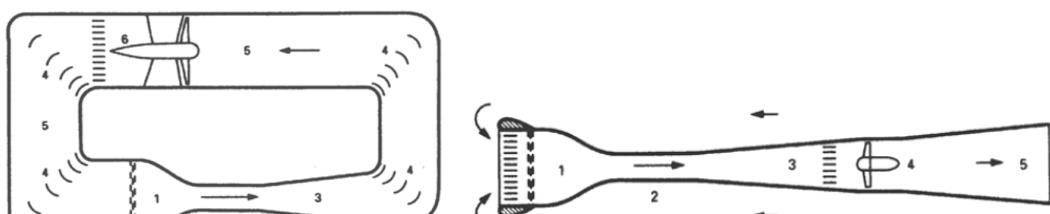
Es una herramienta que puede tener dos fines hoy en día, ya sea para un uso recreativo o para propósito científico. Como uso científico se utiliza para observar los efectos del movimiento de aire al rededor de objetos sólidos, como también para la calibración de anemómetros, entre otros usos.

3.1. Clasificación

Los túneles de viento se pueden clasificar en túneles abiertos o cerrados y a su vez pueden ser verticales u horizontales (Figuras: 3.1 y 3.2)



Figura 3.1: Tunel vertical de uso recreativo



(a) Túnel tipo cerrado

(b) Túnel tipo abierto

Figura 3.2: Clasificación túneles

3.2. Túnel UNPSJB

3.2.1. Historia

¹ El túnel aerodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos (**LMF**) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (**UNPSJB**) es

¹<http://www.ing.unp.edu.ar/mecanica/Paginas/Tunel.htm>

un circuito abierto (tipo Eiffel) con cámara de ensayos cerrada. Puede clasificarse como un túnel "pequeño de baja velocidad", con una longitud total de 11 m, una velocidad máxima de 18 m/s y una cámara de ensayos con un área de 0,8 m².



Figura 3.3: Tunel UNPSJB

La entrada del túnel cuenta con canalizadores, comúnmente denominados "panal de abejas", que favorecen la formación de un flujo uniforme y homogéneo propiciando mejores resultados en los experimentos.

La cámara de ensayos es vidriada para poder observar con claridad el flujo y está incorporada en un módulo extraíble del túnel, lo cual permite fácil acceso para el armado de los distintos objetos a ensayar.

Los distintos ensayos que se realizan en el túnel son:

- Determinación de coeficientes de resistencia y sustentación de distintos cuerpos y perfiles aerodinámicos.
- Determinación de distribución de presiones a través de diferentes objetos como perfiles aerodinámicos, edificios, puentes, automóviles, etc.
- Visualización con humo del flujo a través de distintos obstáculos.
- Estudio del comportamiento dinámico de generadores eólicos.
- Calibración de anemómetros.

3.2.2. Motor y Variador de velocidad

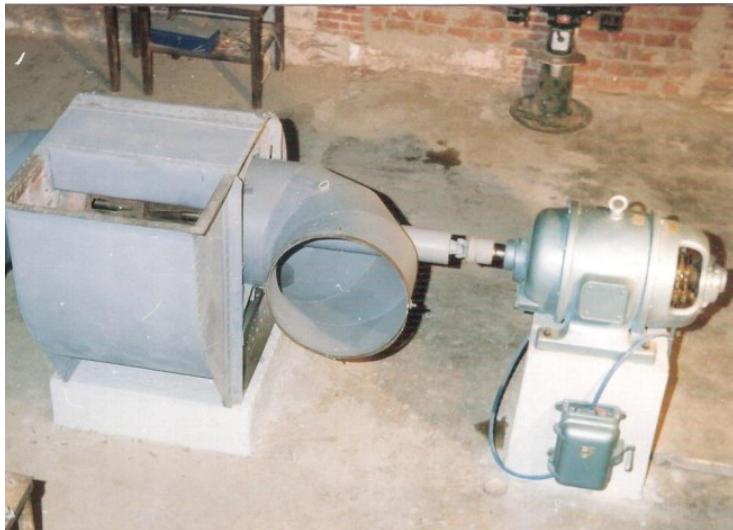
Variador de velocidad

Es utilizado para controlar la velocidad de giro de un motor. Para regular las revoluciones, se debe tener en cuenta las características del motor, ya que este tiene una curva propia de funcionamiento. Un variador es capaz de generar elementos en el control de aceleración, frenado, torque, seguridad y operaciones que mejoran la eficiencia energética.

El motor utilizado para el funcionamiento del ventilador interno del túnel corresponde a la marca **AEG**, de 30 kW de potencia[4]. Desde el año 2020, el laboratorio de Fluidos cuenta con un variador de velocidad de la marca **Long Shenq** modelo **LS650-4045** de 45kW trifásico.

Utilizando este variador la frecuencia puede ser controlada de forma manual por su panel frontal y por entradas tanto de corriente o tensión, las mismas se pueden configurar

para el rango máximo de que podría ser de 0 a 300Hz en ambos sentidos, pero por razones constructivas del motor se utiliza en el rango de 13Hz a 53Hz en un sentido. Al ser un motor antiguo de la década de 1920 este, posee un método de lubricación por cojinetes el cuál fuerza que el motor gire por encima de las revoluciones mínimas y no sobrepase la frecuencia nominal.



(a) Motor y ventilador durante la construcción del túnel



(b) Variador de velocidad LS650

Figura 3.4: Motor y variador de velocidad

3.2.3. Instrumentación

Los instrumentos utilizados en las mediciones del túnel para la contrastación de anemómetros están calibrados y certificados por el INTI (Instituto nacional tecnología industrial).

- **Micromanovacuómetro**

Instrumento utilizado para medir la diferencia de presión.

Marca: Alnor. Modelo: 560. Número de serie: 56057034.

- **Instrumento multifunción**

Utilizado para medir la temperatura, humedad y presión atmosférica. Este mismo elemento puede ser utilizado para medir la velocidad del aire.

Tipo de instrumento: Termómetro electrónico. Sonda de hilo caliente para TESTO 435. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025.

Tipo de instrumento: Anemómetro electrónico. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025.



Figura 3.5: Instrumentación calibrada

4. Fluido- Aire

4.1. Ecuación velocidad del aire

El Laboratorio de Mecánica de Fluidos, antes de comenzar con este proyecto utilizaba un archivo Excel para hacer la corrección de la velocidad del aire. En este se calcula matemáticamente la densidad del aire en función de la presión, temperatura y humedad atmosférica.

$$\rho = \frac{3,48353 \cdot 10^{-3} \text{ kg K J}^{-1} \cdot p \cdot (1 - 0,378 \cdot x_v)}{Z \cdot T} \quad (1)$$

$$x_v = \frac{(\alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot t^2) \cdot (1Pa \cdot e^{AT^2+BT+C+D/T}) \cdot h / 100}{p} \quad (2)$$

$$Z = 1 - \frac{p}{T} \cdot [a_0 + a_1 t + a_0 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + (d + x_v^2) \frac{p^2}{T^2} \quad (3)$$

dónde:

- p [Pa] presión atmosférica medida,
 - t [$^{\circ}\text{C}$] temperatura medida,
 - T [K] temperatura absoluta ($T=t + 273,15\text{ K}$)
 - h [%] humedad relativa medida,
 - y constantes $A, B, C, D, \alpha, \beta, \gamma, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, c_0, c_1, D$.

Finalmente, la ecuación anteriormente nombrada es utilizada para el cálculo final de la velocidad del aire.

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

En vista al objetivo y a las ecuaciones 1 y 4 se estableció necesario la obtención de las variables temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y diferencia de presión del fluido.

4.2. Características del flujo

La inspección cuidadosa en una tubería revela una corriente de fluidos currentilínea a bajas velocidades y caótica mientras la velocidad aumenta por arriba de un valor crítico.

Se dice que el régimen de flujo en el primer caso es laminar, y se caracteriza por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado; mientras que en el segundo caso es turbulento, y se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento desordenado. La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos.

4.2.1. Estimación del número de Reynolds

Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

El número de Reynolds fue calculado a partir de la ecuación 5, que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

$$R_e = \frac{\rho D_h v}{\mu} \quad (5)$$

dónde:

- ρ [kg/m^3] densidad del fluido
- v [m/s] velocidad del fluido
- D_h [m] diámetro hidráulico
- μ [$kg/m.s$] viscosidad dinámica del fluido

La *densidad del fluido* se calculó con la ecuación 1 vista en la sección 4.1 con mediciones de temperatura, humedad y presión atmosférica obtenidas con el instrumento *Testo 435*.

La *viscosidad dinámica* del fluido se obtuvo de la tabla "Propiedades del aire a 1 atm de presión" del libro *Mecánica de Fluidos* [1].

El *diámetro hidráulico* de una tubería de sección rectangular es dependiente del valor de sus lados (Figura 4.1 y 4.2) [2].

Para la *velocidad del fluido* se utilizó un valor de $4,7 m/s$, siendo la velocidad mínima generada por el túnel. Ya que al ser proporcional al número de Reynolds, este será el mínimo valor estimado.

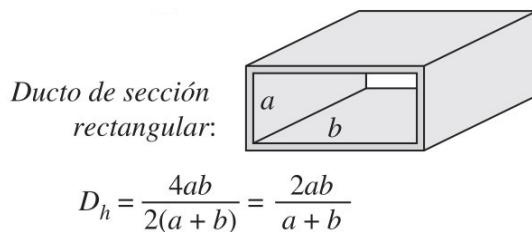


Figura 4.1: Diámetro hidráulico

Si se reemplaza los valores se obtiene:

$$R_e \approx \frac{1,193 \text{ } kg/m^3 \cdot 0,86 \text{ } m \cdot 4,7 \text{ } m/s}{0,000018 \text{ } kg/m.s} \approx 270658 \quad (6)$$

Por definición, un flujo es turbulento si el valor del número de Reynolds es mayor a 4000. Por lo que se observa claramente, que para los valores de velocidad utilizados en el túnel este valor siempre será mayor.

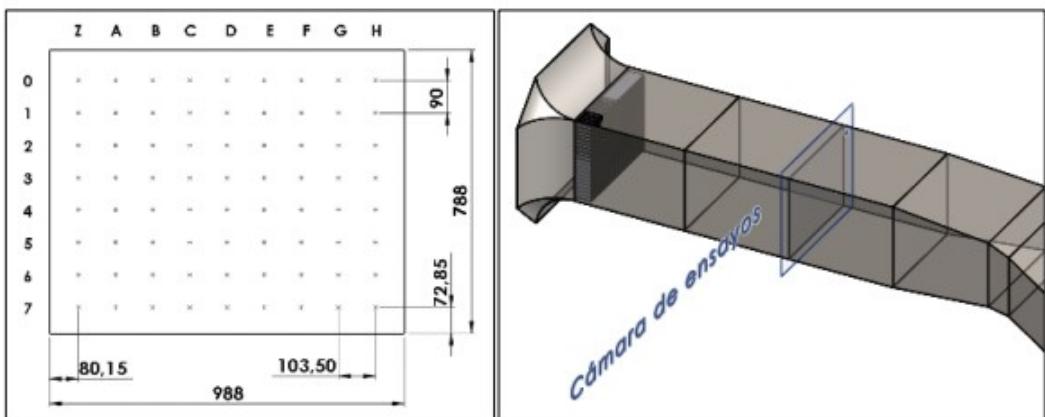


Figura 4.2: Dimensiones de la cámara de ensayos en mm

4.2.2. Flujo turbulento

Flujo turbulento

Este se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos a lo largo del flujo. En flujo laminar, las partículas fluyen en orden a lo largo de trayectorias, en cambio, en flujo turbulento, los molinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo. [1]

Aun cuando el flujo promedio sea estacionario, el movimiento de remolinos en flujo turbulento provoca fluctuaciones importantes en los valores de velocidad, temperatura, presión e incluso densidad (en flujo compresible). Las posibles causas de la formación de estos remolinos se pueden deber a la construcción del túnel. Este, posee una rejilla de entrada en forma de panal de abeja, que al estar cerca de la cámara de ensayos, no logra realizar una correcta formación de flujo uniforme y homogéneo, otra causa es la existencia de orificios en la parte inferior de la cámara que son utilizados para la colocación de instrumentos (Figura 4.3).



Figura 4.3: Perforaciones dentro de la cámara de ensayos y "Panal de abeja"

La figura 4.4 muestra, en este caso, las fluctuaciones alrededor de una velocidad media dentro de un tiempo específico. Para determinar la velocidad media se analiza un intervalo de tiempo suficientemente grande, de modo que el valor promediado en el tiempo se estabilice en una constante.

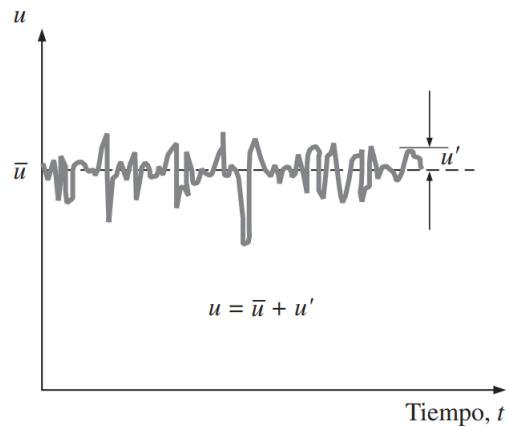


Figura 4.4: Fluctuaciones

5. Desarrollo

5.1. Microcontrolador, sensores y comunicación

Microcontrolador

Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto por unidad central de procesamiento (CPU), memorias (ROM y RAM), líneas de entrada/salida, módulos de comunicación, DAC, ADC, entre otros.

I²C

Es un puerto y protocolo de comunicación serial, define la trama de datos y las conexiones físicas para transferir bits entre 2 dispositivos digitales. El puerto incluye dos cables de comunicación, SDA (Datos seriales) y SCL (reloj serial). Además el protocolo permite conectar hasta 127 dispositivos esclavos con esas dos líneas, con hasta velocidades de hasta 5 Mbps, 10 veces mayor que un puerto serial estándar.

Para la elección del microcontrolador se analizó varios dispositivos, como por ejemplo *Arduino UNO*, *Arduino MEGA*, *Arduino NANO*, *EDUCIAA*, entre otros. Se llegó a la conclusión que **Arduino NANO** era un microcontrolador de bajo costo, tamaño reducido, baja complejidad en la programación, con bibliotecas de diversos sensores y que cumplía con las prestaciones necesarias (señal de PWM, comunicación I²C, entradas analógicas y digitales).

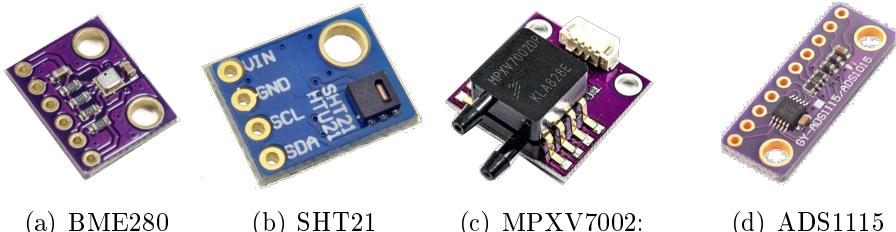
Como se nombró en la sección 4.1, es necesario tener mediciones de temperatura, humedad, presión atmosférica y diferencia de presión. Por lo tanto se realizó ensayos con diversos sensores en una protoboard comunicados con el microcontrolador por medio del protocolo de comunicación I²C. Con las mediciones se eligió aquellos que generaron la menor variación de THP respecto a los instrumentos del laboratorio.

Sensores utilizados

- **BME280:** Sensor de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.
Resolución de temperatura: 0.01 °C
Resolución de humedad: 0,008 % HR
Resolución de presión atmosférica: ±1hPa
- **SHT21:** Sensor de temperatura y humedad relativa.
Resolución de temperatura: 0.01 °C
Resolución de humedad: 0,04 % HR
- **MPXV7002:** Sensor de presión diferencial.
Sensibilidad: 1 V/kPa
Rango de presión: -2 kPa a 2 kPa
- **ADS1115:** Convertidor analógico digital utilizado en conjunto con MPXV7002.
Resolución: 15 bits

Se realizó ensayos para probar y corroborar el funcionamiento del **MPXV7002**, un sensor de diferencia de presión de alto costo en el país. Este sensor es capaz de medir de -2kPa a 2kPa en un rango de 4V (0.5 a 4.5V), al tener un único sentido de flujo, solo se necesitó medir valores positivos de presión.

Al tener una salida analógica se utilizó el conversor analógico/ digital ADS 1115. No se utilizó el ADC interno del microcontrolador Arduino ya que la resolución es de 10 bits y



(a) BME280 (b) SHT21 (c) MPXV7002: (d) ADS1115

Figura 5.1: Sensores utilizados

del ADS1115 de 15 bits. También posee un amplificador de ganancia programable (PGA) que establece la escala completa, es decir, indica el valor de referencia. En Arduino este valor viene determinado por el voltaje de referencia que en el caso de Arduino NANO es 5V. En el ADS1115 lo establece el PGA. Por defecto este valor de referencia es $\pm 6,144$ V, quiere decir que el valor de 32.677 (valor máximo con 15-bit) corresponde a 6,144 V.

Resolución en Arduino NANO:

$$\text{Factor de escala} = \frac{5\text{ V}}{1023} = 0,0048875\text{ V} = 4,88\text{ mV}$$

Resolución en ADS115:

$$\text{Factor de escala} = \frac{6,144\text{ V}}{32677} = 0,0001875\text{ V} = 0,1875\text{ mV}$$

En la tabla 5.1 se observa los valores posibles de factor de escala para distintos PGA. Este valor se eligió para aprovechar la mayor resolución posible al tener en cuenta el sensor utilizado.

PGA	Referencia (V)	Factor de Escala (mV)
2/3	6,144	0,1875
1	4,096	0,125
4	1,024	0,0312
8	0,512	0,0156
16	0,256	0,0078

Tabla 5.1: Factor de escala

En el caso de este proyecto, se utilizó un valor de PGA de 1, tomando como voltaje de referencia 4,096V.

$$\text{Factor de escala} = \frac{4,096\text{ V}}{32677} = 0,000125\text{ V} = 0,125\text{ mV}$$

5.2. Adquisición de datos por puerto serie

Processing

Es un lenguaje de programación basado en Java, aunque hace uso de una sintaxis simplificada y de un modelo de programación de gráficos.

Para realizar la adquisición de datos por puerto serie, se utilizó en un primer momento Matlab, dónde, al realizar la comunicación con el microcontrolador, se guardaban los valores, pero estos no podían ser observados en tiempo real, sino que luego de las pruebas,

se utilizaba otro script para obtener conclusiones. Luego de cierta cantidad de pruebas realizadas, se tornó indispensable observar los valores adquiridos, como la velocidad medida. Para solucionar el inconveniente, se realizó una primera versión (Figura 5.2) de un programa gráfico generado con Processing. Este código fue capaz de adquirir datos desde el microcontrolador en tiempo real y mostrarlos tanto gráficamente como numéricamente. Para realizar la estimación de la planta (Sección 5.5), era necesario poder implementar escalones de señal al variador de velocidad a través del microcontrolador. Esto fue posible ingresando valores numéricos por teclado que eran enviados para generar la respectiva señal que luego sería ingresada al microcontrolador. Al presionar una tecla específica configurada por los comandos, el programa guardaba los datos adquiridos durante la prueba en un archivo .csv que luego podrán ser observadas con Matlab.



Figura 5.2: Pantalla Processing

5.3. Filtros

Mediana

Es una técnica de filtrado digital no lineal que suele utilizarse para eliminar el ruido de una imagen o señal. La mediana es el número que está justo en el medio de un conjunto de datos ordenados de menor a mayor o de mayor a menor. La idea principal del filtro de mediana es recorrer la señal entrada, sustituyendo cada dato por la mediana de una ventana de “N” datos.

Una vez que se procedió a tomar diversos valores, se notó necesario la implementación de un filtro. Para esto se utilizaron varias librerías de **Arduino** para generar distintas pruebas (Figura 5.3).

Luego de varias pruebas, se eligió un filtro de mediana (Figura 5.4) con una ventana 40, que producía menor ruido en la velocidad del aire. Se implementó en el programa de **Arduino** utilizando la una función preestablecida.

5.4. Error observado

Las pruebas anteriores eran realizadas con el uso normal que se le daba al variador de velocidad utilizando el panel digital frontal.

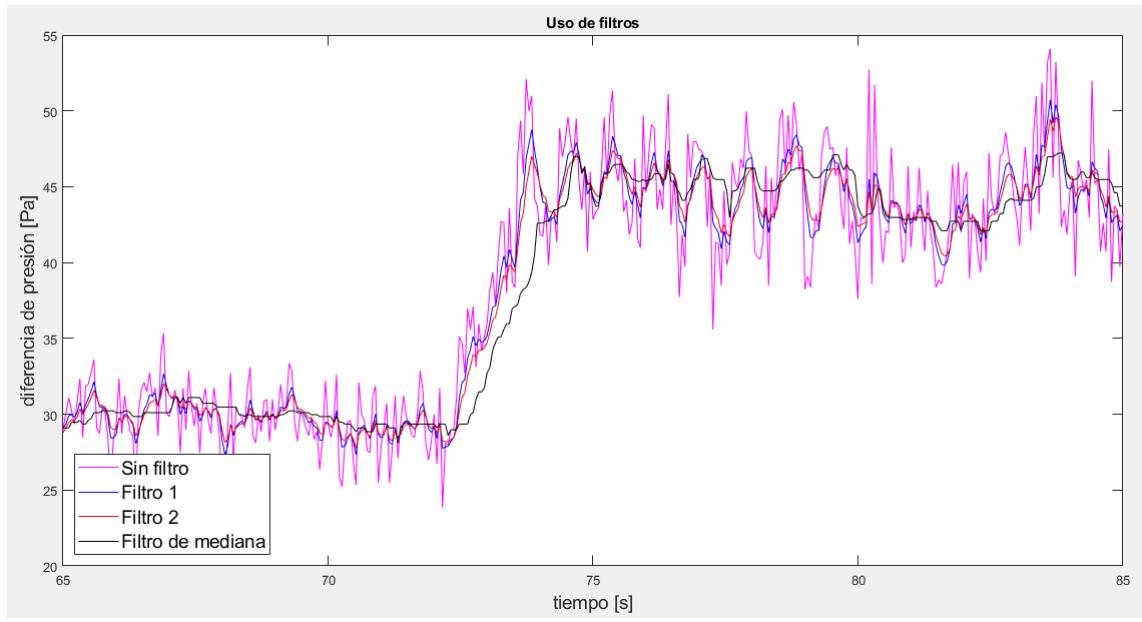


Figura 5.3: Datos y diversos filtros

Luego, para comenzar con las pruebas de otros modos de funcionamiento del variador, se utilizó el potenciómetro frontal. Al utilizar este modo se originó error en la aceleración. Al hacer las averiguaciones pertinentes, esto se debió a una configuración interna del variador: si se utiliza con el panel digital frontal, la curva de aceleración y desaceleración sigue una “s”, no realizando un cambio brusco en la velocidad del motor, en cambio, para el uso del potenciómetro u otro modo de funcionamiento la curva es lineal . Para revertir esto, se modificó el tiempo de aceleración y desaceleración a 20 segundos.

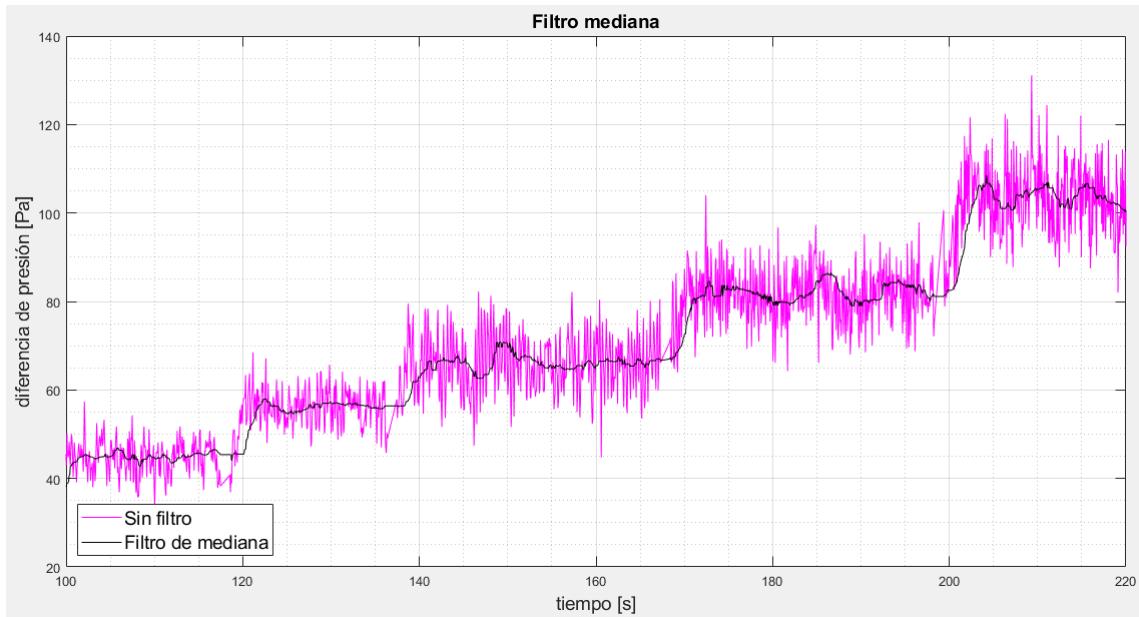


Figura 5.4: Datos y filtro mediana

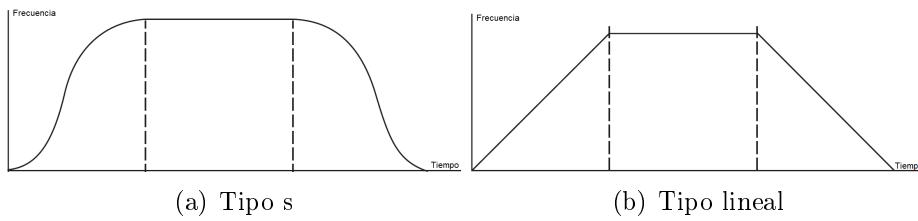


Figura 5.5: Curva aceleración y desaceleración

Una vez corroborado que el error ya no ocurrió nuevamente, se procedió a ingresar la señal del lazo de corriente para controlar el variador de velocidad.

Para la comunicación del **Arduino** con el variador de velocidad se decidió utilizar un lazo de corriente de 0-20mA, este tiene ventajas sobre el lazo de tensión ya que el utilizado es más estable en largas distancias y más inmune a los ruidos eléctricos e interferencias electromagnéticas respecto al lazo de tensión. Normalmente, se utilizan lazos de corriente de 4-20mA para poder observar si hubiera fallas en el circuito, pero este modelo de variador, tiene el piso del lazo de corriente en 0mA, el cual fue modificado para que sea utilizado de 4 a 20mA. Cabe mencionar, que el variador podía ser controlado por cualquiera de los dos métodos de lazos.

A continuación se observará la placa interna del variador con sus respectivas borneras por donde ingresará la señal de corriente del lazo de control y el jumpper que se tuvo en cuenta para que sea lazo de corriente y no de tensión.

La señal para controlar el variador de velocidad fue generada por una señal PWM estipulada a través de la librería TIMEROne. La instrucción Timer1.initialize(period) de Arduino inicializa el timer con el valor de period, este valor es el tiempo en el que se dispara el temporizador y en el caso de este proyecto es de 40 microsegundos.

El otro comando que se utilizó fue Timer1.pwm(pin, duty) que establece el número de pin, en este caso pin 9 y “duty” es un valor entre 0 y 1023 establecido por la programación. Esta señal de salida, fue necesario transformarla al lazo de corriente utilizado para establecer la señal al variador de velocidad. Esto se realizó a través de una placa adaptadora con un

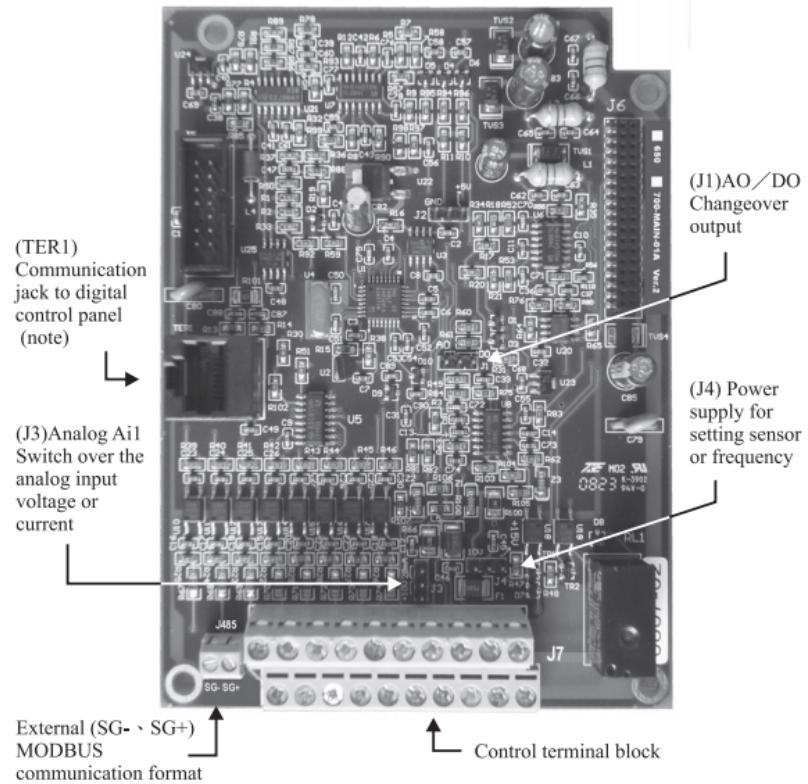


Figura 5.6: Placa de control

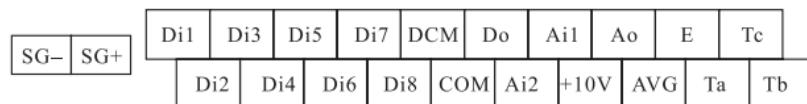


Figura 5.7: Terminales de control

filtro generada por nosotros.

5.5. Estimación de la planta

5.5.1. Diagrama de trabajo

Para realizar la estimación de la planta se muestra un diagrama de bloques del procedimiento que se siguió de forma resumida.

Generación de datos: De acuerdo a diversas pruebas realizadas, se eligen las variables de mayor interés para analizarlas y así poder enviar la información de forma eficaz.

Captura de datos: A través del puerto serie y con Processing se realiza el almacenamiento de los datos de respuesta del sistema ante el estímulo de las señales de excitación. Posteriormente, el análisis de los datos y la generación de las gráficas correspondientes es realizado por medio de rutinas de código implementadas en Matlab.

Identificación del modelo matemático: Se utilizaron varios métodos de identificación experimental, todos ellos analizados con la respuesta al escalón del sistema.

Validación del modelo matemático: Una vez obtenida la mejor estimación, se efectuó una validación adicional a partir de la comparación de datos experimentales con los teóricos generados en simulaciones.

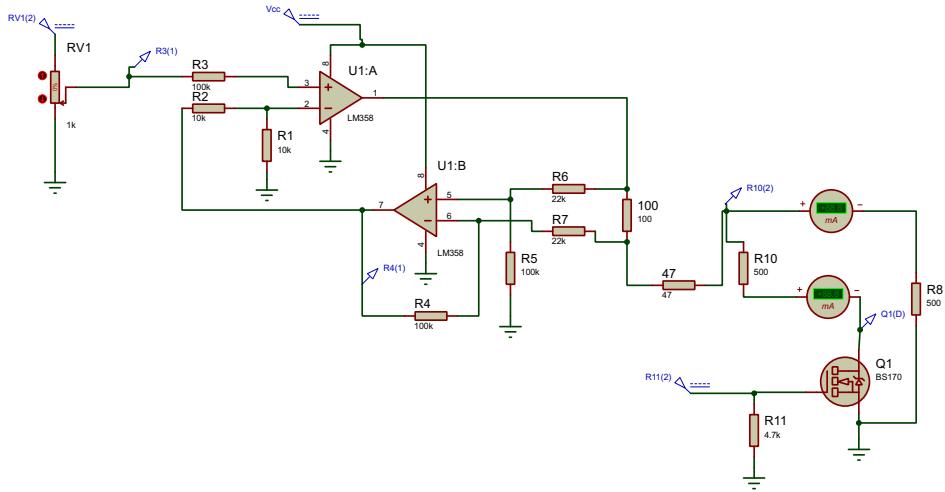


Figura 5.8: Placa adaptadora de señal

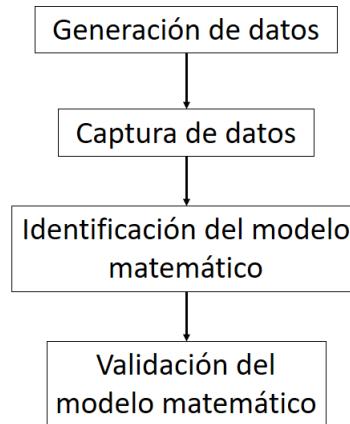


Figura 5.9: Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta

5.5.2. Método de estimación

Una vez que se determinó valores de ventana de filtro, velocidad de conmutación de PWM, tiempos de aceleración y desaceleración, etc. Se utilizó el modo de ingreso de señal por lazo de corriente al variador de velocidad.

La Figura 5.10 muestra un diagrama resumido de los pasos a realizar para tomar datos de la planta. Siendo $G(s)$ el conjunto del túnel de viento, variador de velocidad y motor.

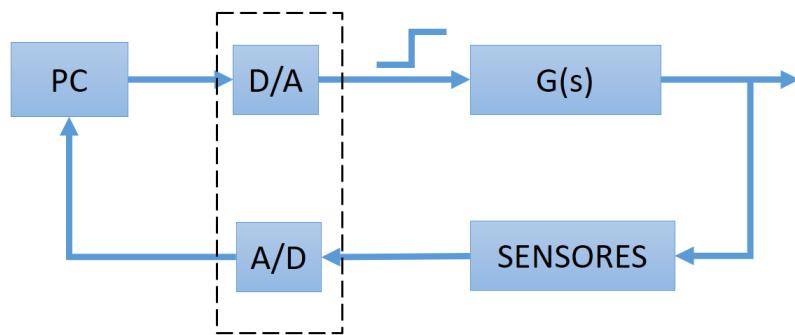


Figura 5.10: Diagrama en bloques

Para realizar la estimación de la planta se obtuvo y guardó tablas de datos con Processing, en las que se generó distintos escalones de entrada para la obtención varias mediciones. En la figura 5.11 se observan los datos de dos columnas de las tablas anteriormente generadas.

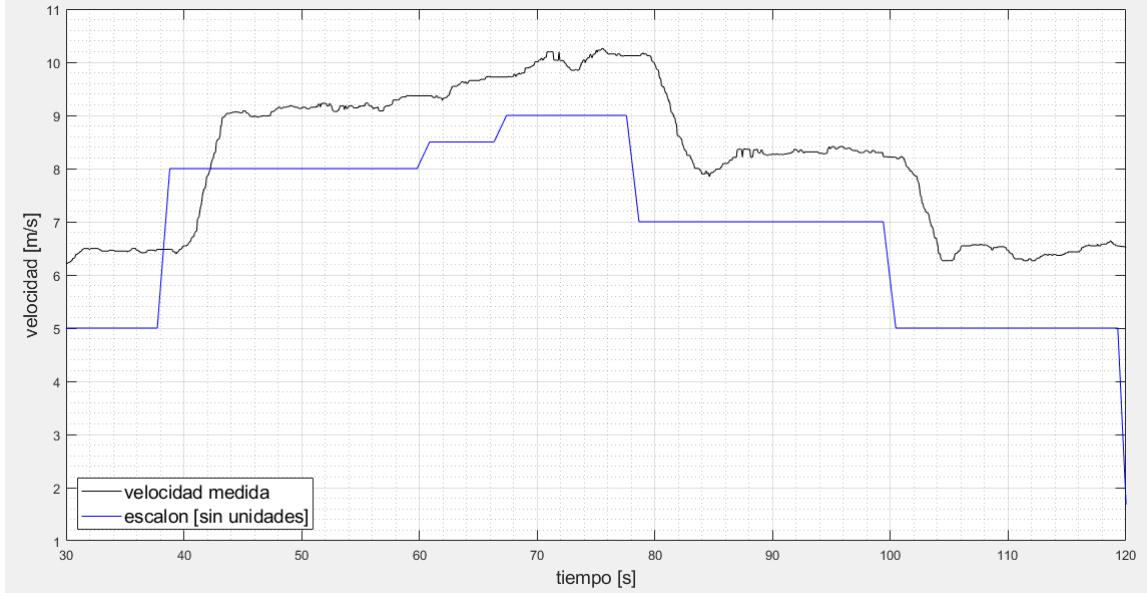


Figura 5.11: Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados

Seguidamente, se procedió a generar un nuevo código de Matlab donde se cargaron los valores obtenidos de la figura (a) 5.12 para realizar la estimación de la planta a través de la comparación con la función de transferencia de un sistema de "2º orden con retardo" [3].

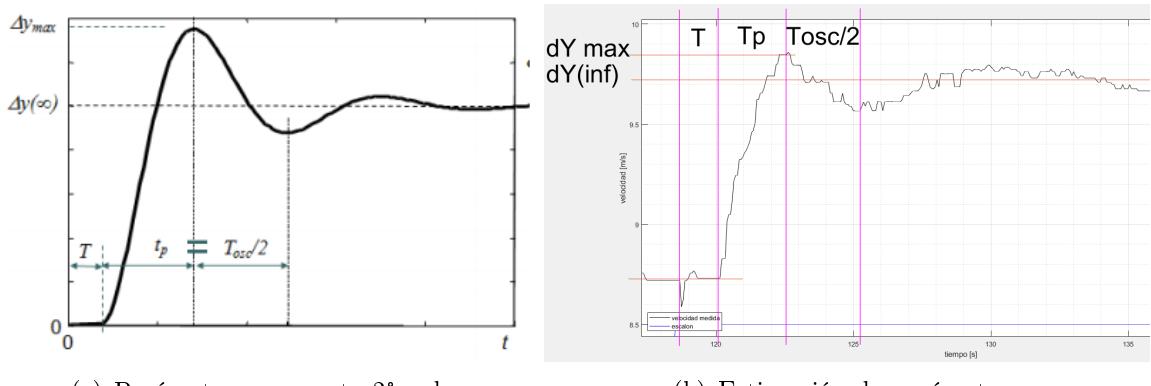


Figura 5.12: Estimación de planta

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} * e^{-T.s} \quad (7)$$

Sobreoscilación:

$$\delta = \frac{\Delta y_{max} - \Delta y(\infty)}{\Delta y(\infty)} = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \rightarrow \text{Para obtener } \xi \quad (8)$$

Tiempo de pico:

$$t_p = \frac{T_{osc}}{2} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \rightarrow \text{Para obtener } \omega_n \quad (9)$$

Con ayuda del código y ajustes manuales se llegó a una función de transferencia de segundo orden:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,02483}{s^2 + 1,846s + 1,535} \quad (10)$$

Para corroborar la elección de la planta se realizó en *Simulink* la respuesta del sistema a los mismos escalones experimentales. Seguidamente en el gráfico se dispuso la respuesta experimental en conjunto con la simulación (Figura 5.13 y Figura 5.14).

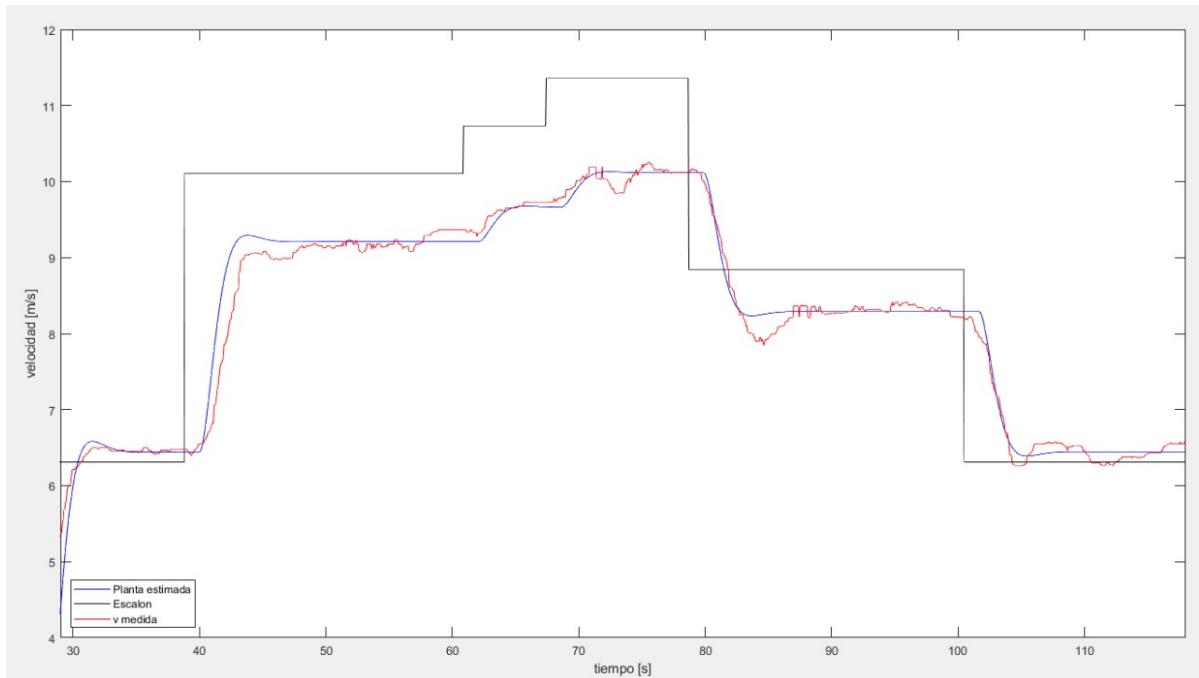


Figura 5.13: Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 1

5.6. Control

Para realizar una primera estimación de un PID se utilizó la herramienta de *Matlab*, a partir de ahí se realizaban pequeñas modificaciones y se realizaban las simulaciones quedando todos del formato PI (proporcional - integrador). Con los valores anteriormente nombrados se realizaron pruebas en el Túnel del viento con escalones de velocidad de referencia de 6 - 7,5 - 8,5 - 7,5 - 7 - 6 m/s, haciendo un total de 5 pruebas, con PI distintos para los mismos escalones.

Los valores de cada PI utilizados se muestra en la tabla siguiente

Uniendo todos los resultados obtenidos por los distintos PI utilizados se puede realizar las comparaciones para un escalón donde la velocidad sube (figura 5.16) y otro donde la velocidad baja (figura 5.17).

En la figura 5.18 se pueden observar el sistema que genera mayor sobrepico, un sistema con una respuesta mas lenta, y un sistema con respuesta intermedia.

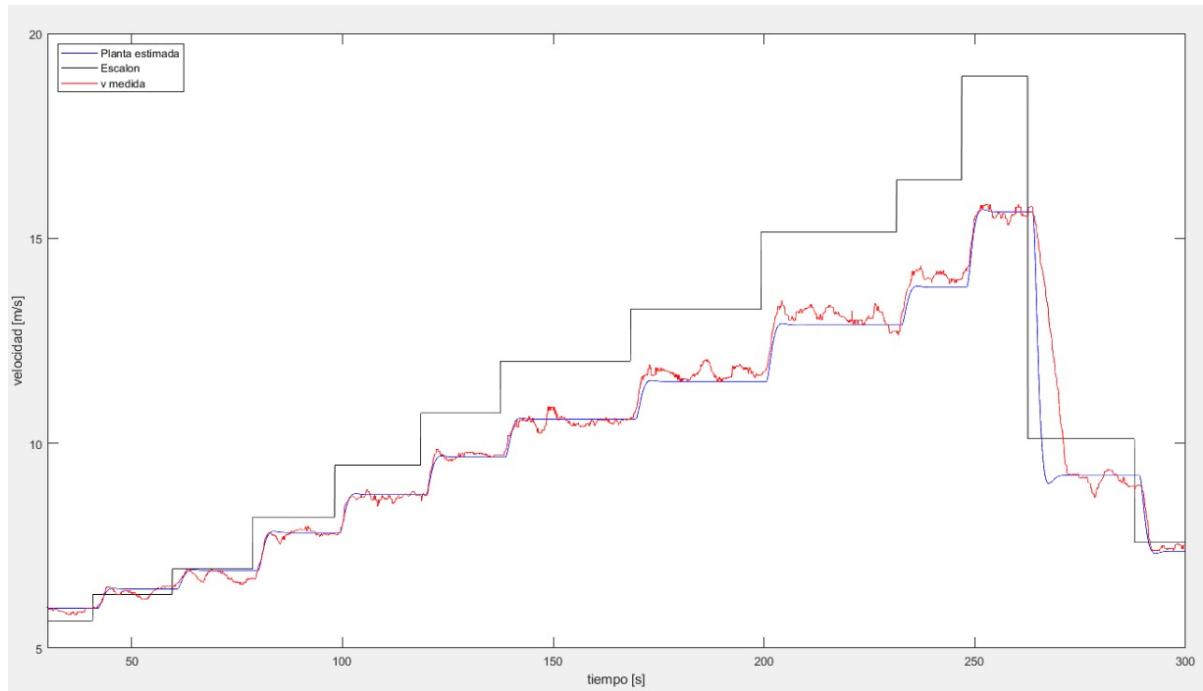


Figura 5.14: Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2

	PI anterior	Prueba3	Prueba4	Prueba5	Prueba6	Prueba7
P=	0.225	0.0699	0.244	0.5451	0.6846	0.3286
I=	0.326	0.2035	0.2756	0.3599	0.4183	0.3107

Tabla 5.2: Valores de PID's

6. Pruebas realizadas

6.1. Comparación de densidades

Una vez que se tuvo seguridad con los sensores elegidos se procedió a realizar una placa con estos elementos para que no se desconecten y no se produzcan errores como solía suceder mientras estaban en la protoboard (Figura 6.1).

A raíz de varias mediciones, durante distintos días, y realizando el contraste con el instrumento **TESTO 435** se decidió sacar de la caja donde estaban a los sensores de temperatura y humedad para que luego el cálculo de la velocidad del aire no esté desfasado, ya que esta caja utilizada generaba un ambiente distinto al real dentro del laboratorio. Al colocar el sensor del lado externo, se realizaron tomas de valores en distintos momentos. Con ambos conjuntos de datos se procedió a obtener los valores de la densidad calculados con la fórmula. Estos datos están expresados en la tabla 6.1.

Referencias de la tabla:

- **I:** Instrumentos- Datos obtenidos con los instrumentos del Laboratorio de fluidos.
- **S:** Sensores- Datos obtenidos a partir de la medición con los sensores utilizados en conjunto con Arduino.
- **interior**- Mientras se realizaron las mediciones el sensor SH21 se encontraba dentro de la caja dónde estaba el Arduino y la placa reguladora.
- **exterior**- Las mediciones se realizaron con el sensor SH21 en el lado exterior sin

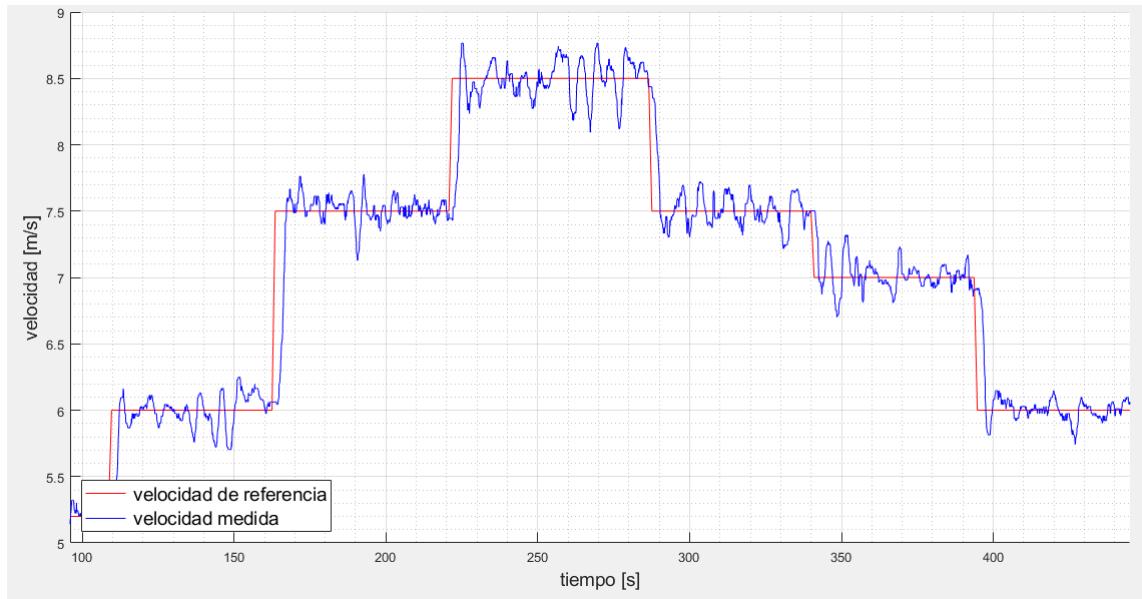


Figura 5.15: Ejemplo de prueba realizada

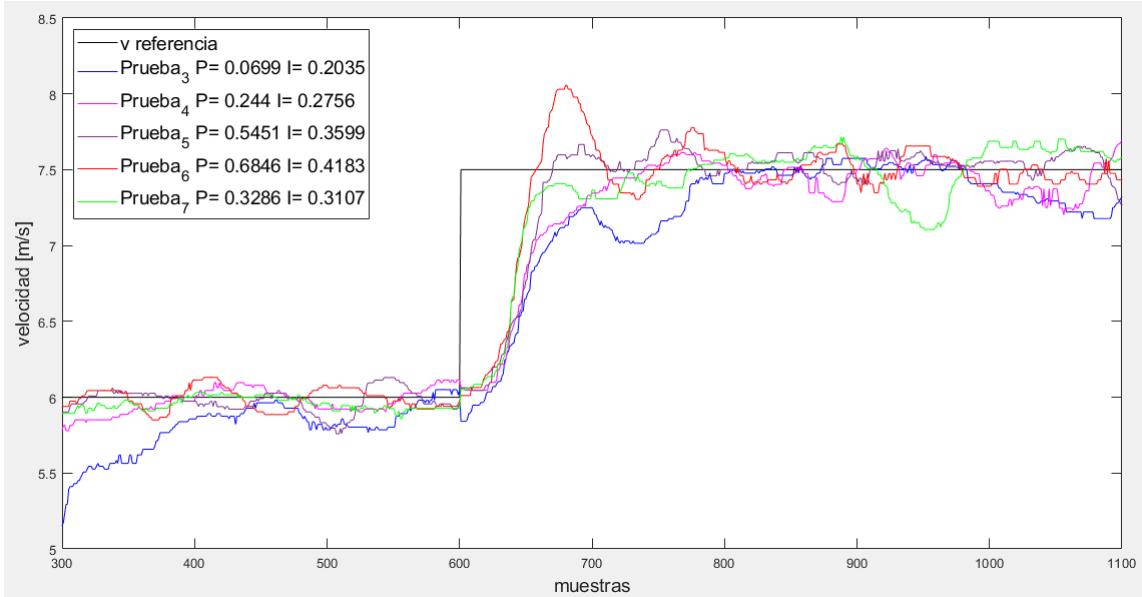


Figura 5.16: Comparación de PI, escalon de subida

que fuera afectado por el calentamiento del Arduino y la placa reguladora. Tomando como valor verdadero los valores de THP medidos con los instrumentos calibrados, se puede observar que el error relativo es menor al 1 %.

6.2. Fluctuaciones de velocidad

Para corroborar esta propiedad, se usaron datos medidos y a través de un código generado en Matlab y se corroboró el promedio de las fluctuaciones que tiende a cero (Figura 6.2).

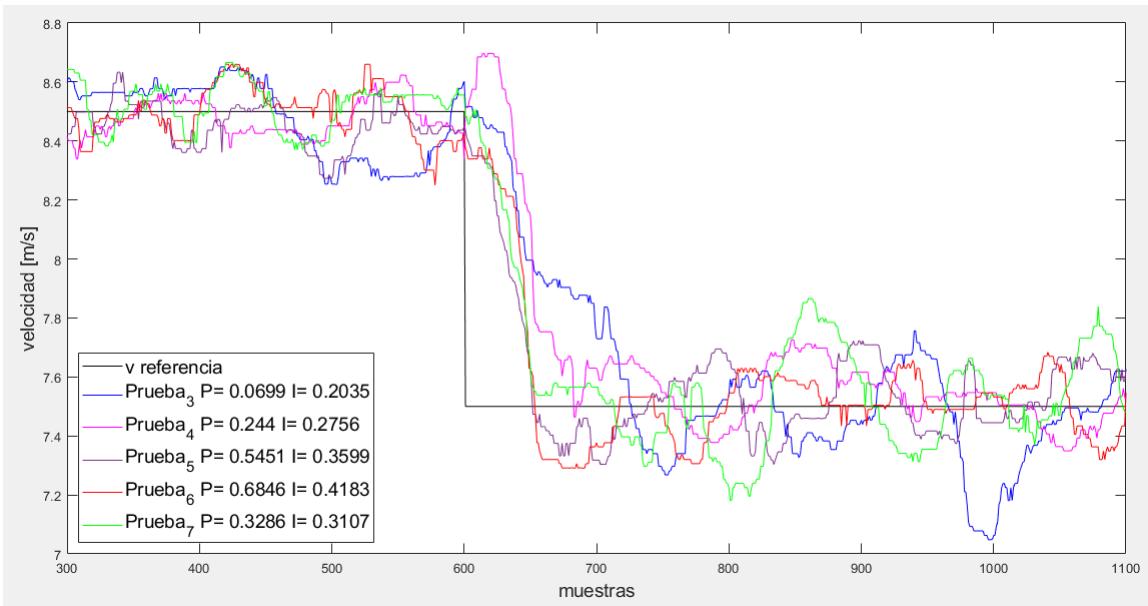


Figura 5.17: Comparación de PI, escalon de bajada

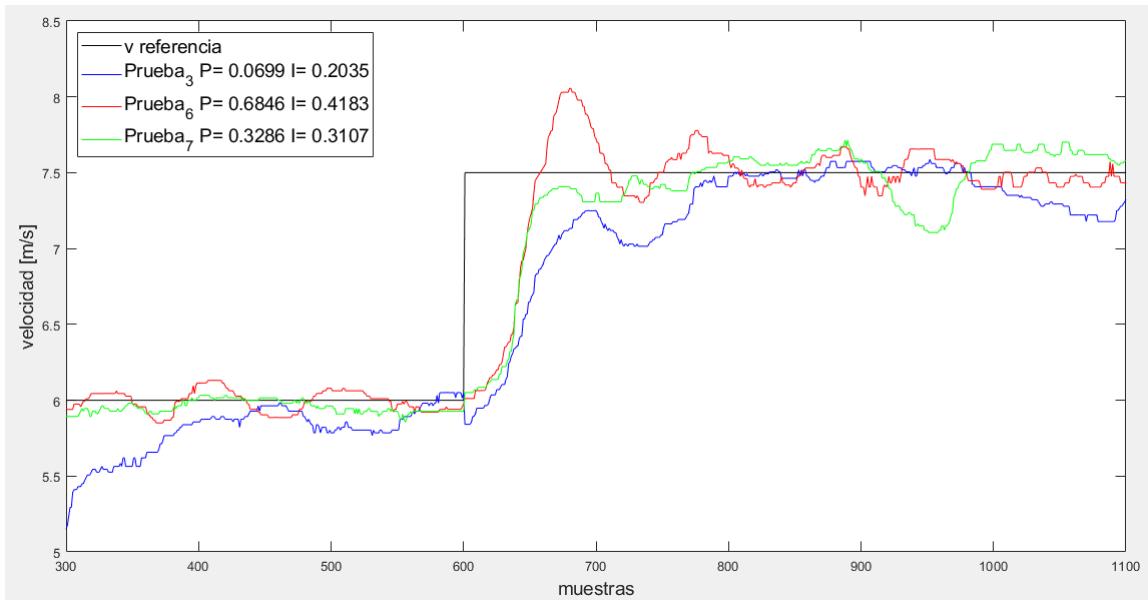


Figura 5.18: Comparación 3 sistemas PI

6.3. Estimación de la densidad ante cambios de Temperatura y Humedad

Notamos conveniente realizar la comparación de las densidades calculadas ante las variaciones que se tenían de humedad y temperatura respecto a los datos tomados por los elementos calibrados. En la tabla 6.2 se observa en las celdas internas los valores calculados de densidad para humedad de 38 % y 40 % y temperatura 19°C y 21°C, estos datos fueron elegidos al observar las máximas variaciones de los datos tomados con el sensor *SH21* y el instrumento *Testo 435*, manteniendo presión atmosférica constante. (Los valores con fondo gris corresponden a la diferencia de valores)

Si se calcula la velocidad del aire con la formula 4 y con los datos de la tabla 6.2 utilizando una diferencia de presión constante de 32Pa se puede observar que la diferencias

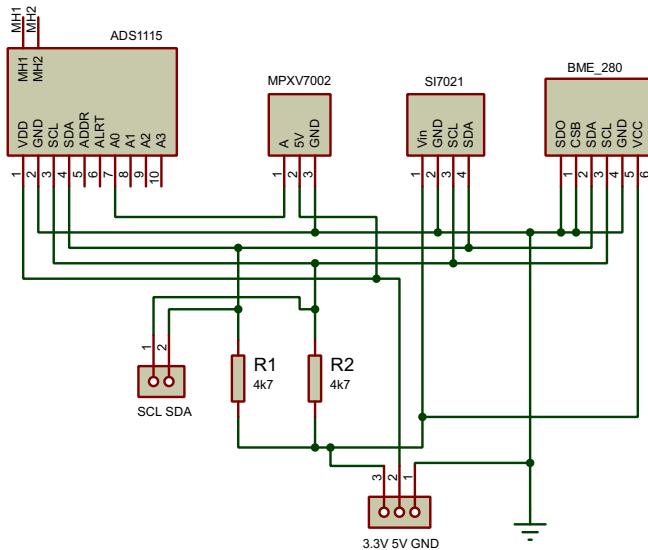


Figura 6.1: Esquema de placa con sensores utilizados

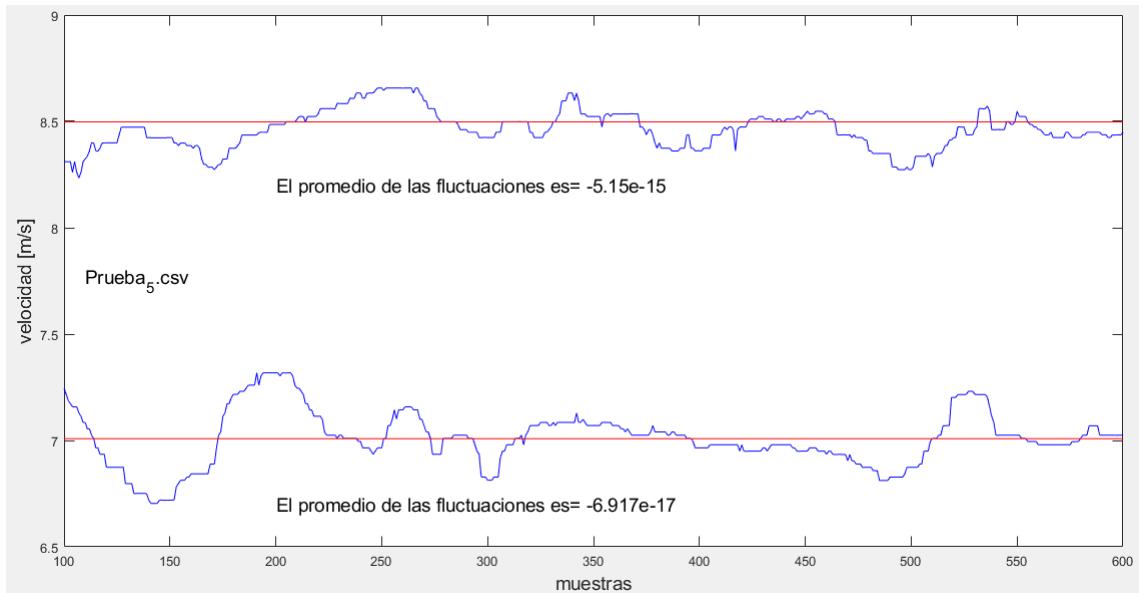


Figura 6.2: Fluctuaciones en velocidades medidas

Fecha	Obs.	T [$^{\circ}C$]		H [%]		P [Pa]		Dens. calculada [kg/m^3]		e_r [%]
		I	S	I	S	I	S	I	S	
29-abr	interior	19,4	19,3	43,5	38,5	100400	100450	1,1916	1,1931	0,128
14-may	interior	16,1	18,4	54,6	43,5	101590	101570	1,2195	1,2099	0,781
14-may	interior	16,5	18,9	53,7	42,5	101559	101559	1,2173	1,2077	0,794
17-jun	exterior	15,2	15,5	54,3	48,6	103100	103090	1,2418	1,2404	0,109
17-jun	exterior	13,8	15,1	59,2	52,4	102970	102910	1,2463	1,2397	0,527
07-jul	interior	17,6	18,8	43,3	34,8	100260	100261	1,1978	1,1933	0,375

Tabla 6.1: Comparación de densidades calculadas

		Temperatura		
		19°C	21°C	
Humedad	38 %	1,1945758	1,1859383	-0,0086376
	40 %	1,1943783	1,1857162	-0,0086621
		-0,0001976	-0,0002221	

Tabla 6.2: Densidad del aire ante cambios de TH

de velocidades son inferiores a 0,03m/s (tabla 6.3) ante un cambio de dos grados de temperatura por lo que no se ve necesario realizar una corrección de valores. (Los valores con fondo gris corresponden a la diferencia de valores)

		Temperatura		
		19°C	21°C	
Humedad	38 %	7,3195288	7,3461357	0,0266068
	40 %	7,3201342	7,3468236	0,0266894
		0,0006054	0,0006879	

Tabla 6.3: del aire ante cambios de TH

6.4. comparación de la frecuencia vista en el panel con el valor de PWM

6.5. Contrastación de diferencia de presión

El sensor *MPX7002* tiene como salida voltaje proporcional a la diferencia de presión medida, por lo que fue necesario utilizar un *ASD1115* para transformar estos valores, a través de una constante, en unidades de presión.

Para realizar la contrastación de la diferencia de presión ocasionada dentro del túnel por el aire, se procedió a realizar mediciones con el instrumento calibrado *AXD 650*. Al poseer fluctuaciones anteriormente habladas a causa del flujo turbulento, se procedió a filmar el instrumento y aparte los datos obtenidos por nuestro sistema. Ambos videos se unieron y se realizaron diversas pausas para tomar al mismo tiempo ambos valores leídos. Como resultado se obtuvo la tabla 6.4, generando luego un gráfico de puntos con las muestras tomadas, observando que el error es mayor para diferencias de presión mayores a 100 Pa 6.3.

6.6. Contrastación de velocidades

como contrastación final.... ver PRUEBA_10_PID el error es mucho mayor que el de velocidad en función de la TH. no tiene sentido comparar ambos porq para ellos usamos un anemómetro (podríamos ver de usar el anemómetro de ventilador? y el de testo para ver los distintos valores y nosotros con el código en función de THP)

6.7. Perturbaciones

Para observar la respuesta del control se generó perturbaciones utilizando las compuertas laterales del túnel (Figura 6.4), antes utilizadas para realizar variaciones de velocidad[4]

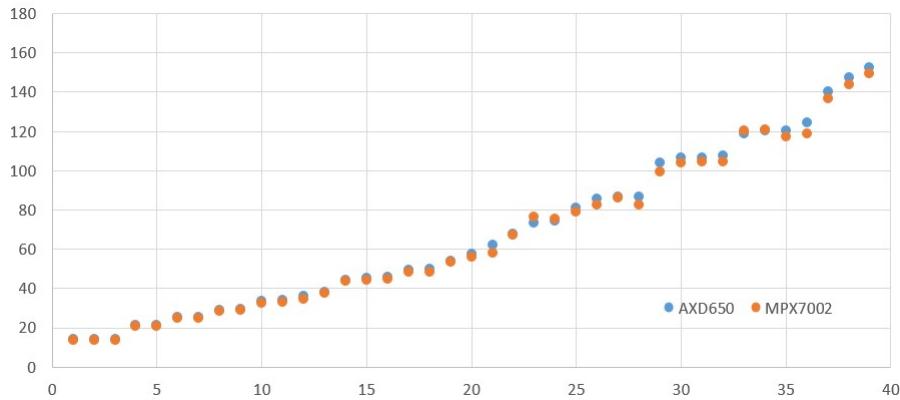


Figura 6.3: Contrastación de diferencia de presión

cuando el laboratorio no poseía variador y era utilizado el motor con un reóstato (Figura 6.5).



Figura 6.4: Compuertas utilizadas como perturbaciones

Para realizar estas pruebas de funcionamiento primero se encendió el túnel, se comenzó a guardar valores y se controló la velocidad del aire en 6 m/s , luego de unos segundos de funcionamiento se procedió a abrir las compuertas con el panel que se ve del lado derecho de la figura 6.4. Esta entrada de aire producía variaciones en la velocidad que el control implementado corregía según el PID utilizado. Dependiendo la prueba, se abrió y se cerraron las compuertas para observar estos cambios y el correcto control de velocidad.

Diferencia de presión [Pa]		
AXD650	MPX7002	E_r
14	13,51	3,50 %
14	13,76	1,71 %
14	13,76	1,71 %
21,3	20,88	1,97 %
21,5	20,88	2,88 %
25,3	24,8	1,98 %
25,4	24,8	2,36 %
28,9	28,51	1,35 %
29,3	28,8	1,71 %
33,4	32,5	2,69 %
34,1	32,88	3,58 %
35,9	34,8	3,06 %
38,1	37,38	1,89 %
44,2	43,88	0,72 %
45,5	44,5	2,20 %
45,9	44,88	2,22 %
49,4	48,51	1,80 %
49,9	48,51	2,79 %
54	53,26	1,37 %
57,7	56,2	2,60 %
62,1	58,13	6,39 %
68	67,13	1,28 %
73,4	76,6	-4,36 %
74,3	75,26	-1,29 %
81,1	79,01	2,58 %
85,5	82,76	3,20 %
86,4	86,1	0,35 %
86,8	82,63	4,80 %
104	99,26	4,56 %
106,5	104,13	2,23 %
106,8	104,5	2,15 %
107,8	104,63	2,94 %
118,8	120,13	-1,12 %
120,4	120,6	-0,17 %
120,5	117,38	2,59 %
124,4	119	4,34 %
140,1	136,6	2,50 %
147,2	143,8	2,31 %
152,7	149,38	2,17 %

Tabla 6.4: Comparación de Diferencia de presión



Figura 6.5: Fotos del reóstato (izquierda) y del banco de resistencias (derecha)

7. Implementación

La implementación final constó de dos bloques (Figura 7.1), uno de APLICACIÓN (Sección 7.1) y otro de HARDWARE (Sección 7.2).

7.1. Bloque Aplicación

GUI

La interfaz gráfica de usuario utiliza un conjunto de objetos gráficos para representar información y realizar acciones. El principal uso es un entorno de comunicación entre el usuario y algún elemento a controlar.

Para la interfaz gráfica se creó un ejecutable para Windows, donde se utilizó el programa de código abierto “Processing”. La aplicación cuenta con comandos para configurar el funcionamiento del variador, configurar velocidades, realizar adquisición de datos y observar parámetros en tiempo real. En el diagrama de flujo de la Figura 7.2 se observa que “aplicación” se divide en dos partes:

1. Bloque “Adquisición de datos”:

Obtiene datos provenientes del microcontrolador que son utilizados para guardar datos en un archivo “.csv”.

Adquiere los datos que luego son utilizados por el bloque VISUAL.

Los datos que se reciben desde el microcontrolador durante el proceso de adquisición de datos consta de una cadena de caracteres en formato “string” dónde los distintos parámetros son separados por comas.

D_0	,	D_1	,	D_2	,	D_3	,	D_4	,	D_5	,	D_6	,	D_7	,	D_8	,	D_9	,	D_{10}	,	D_{11}	,	D_{12}	,	D_{13}	,
-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	----------	---	----------	---	----------	---	----------	---

- D_0 : velocidad estimada utilizando THP y diferencia de presión.

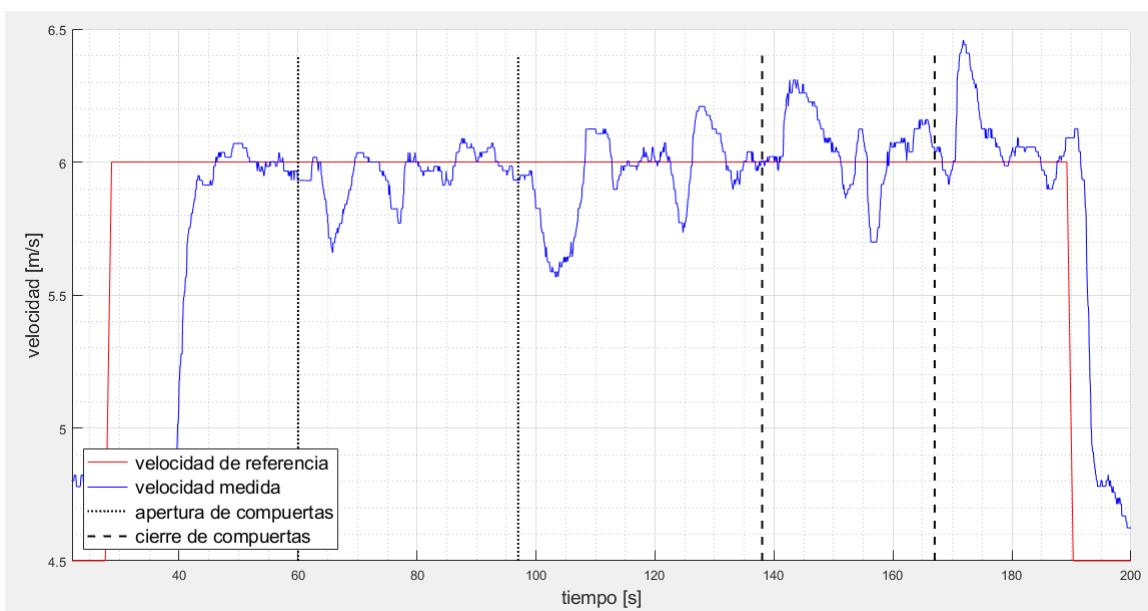


Figura 6.6: VER QUE POINER

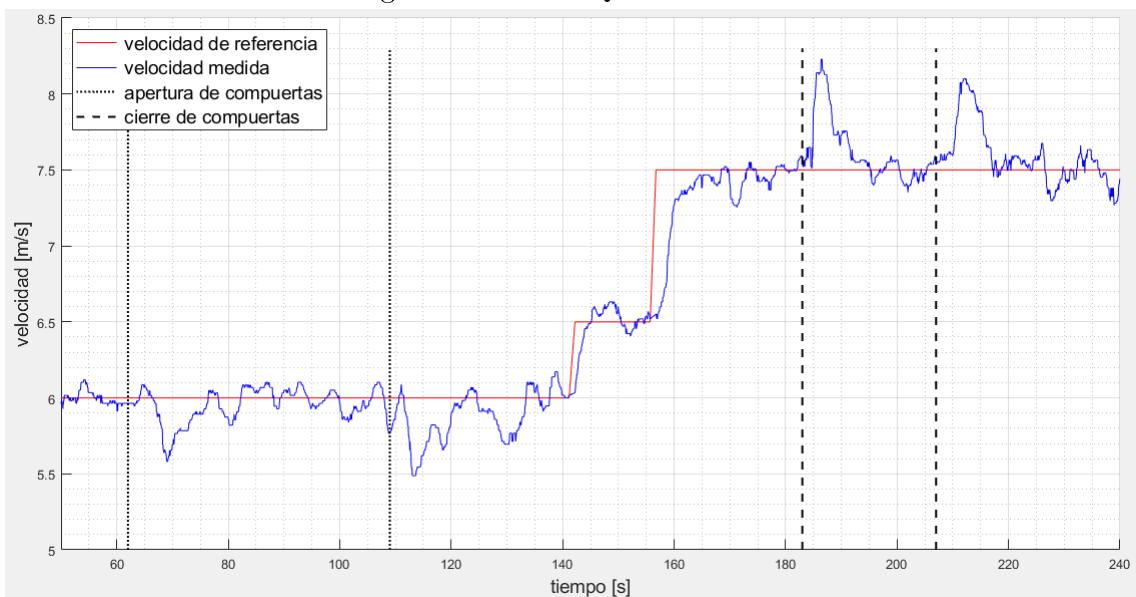


Figura 6.7: VER QUE POINER okkkk

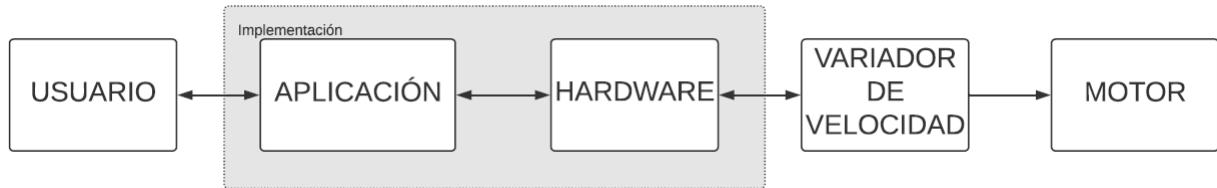


Figura 7.1: Bloques implementados

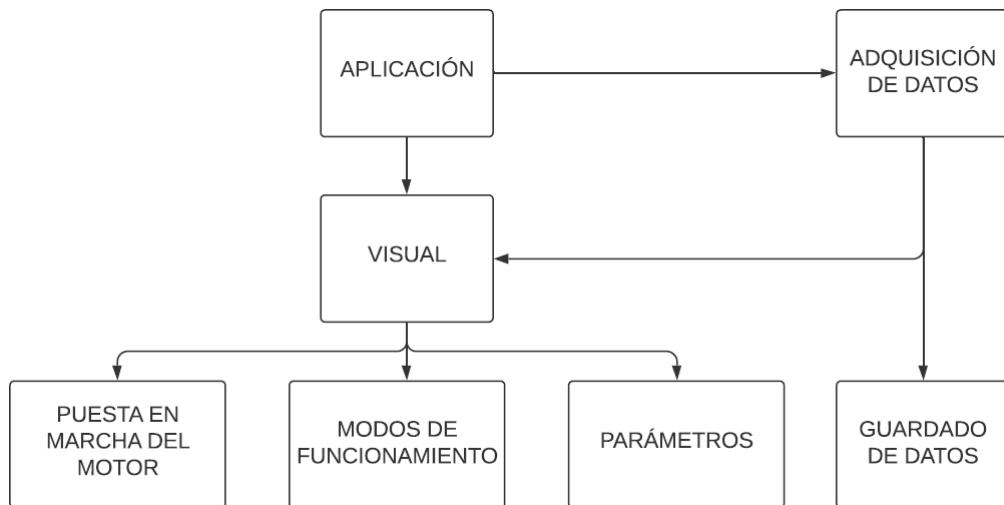


Figura 7.2: Bloque Aplicación

- D_1 : velocidad o frecuencia de referencia.
- D_2 : diferencia de presión medida a través del MPX7002 en conjunto con ADS1115.
- D_3 : señal de acción de control.
- D_4 : tiempo otorgado por el microcontrolador.
- D_5 : temperatura ambiente.
- D_6 : humedad relativa del ambiente.
- D_7 : presión atmosférica.
- D_8 : densidad estimada por el microcontrolador.
- D_9 : señal si se encuentra activado el control.
- D_{10} : error entre la velocidad estimada y la de referencia.
- D_{11} : estado encendido/apagado del motor.
- D_{12} : indicación de algún error del variador de velocidad.
- D_{13} : indicación de comienzo y fin del control automático.

2. Bloque Visual:

- Sub-bloque **Parámetros**: con los datos adquiridos, muestra los valores de TPH, v y v/f ref y realiza gráficos en tiempo real donde el usuario decide la visibilidad de distintos parámetros (v, v/f ref, dDP, accion de control) y su correspondiente escala.
- Sub-bloque **Puesta en marcha del motor**: En el sub-bloque 'PUESTA EN MARCHA DEL MOTOR' se encuentran botones de RUN y STOP que pondrán en marcha y pararán el motor según la configuración de F7 del variador de velocidad. En este bloque también se encuentran el botón de parada de emergencia y el botón de "Reset" ante alguna falla.

- Sub-bloque **Modos de funcionamiento**: posee las siguientes formas de ejecución del microcontrolador:
 - Modo Lectura de datos: al realizar la conexión del puerto serial, el microcontrolador comienza a adquirir datos, mostrando THP, velocidad y frecuencia de referencia por defecto. El modo solo recibe datos del microcontrolador pero esta configuración espera comandos de autofunción o del Modo Ai1 para enviar al microcontrolador una nueva orden.
 - Modo Autofunción: El modo cierra el lazo de control, lee un archivo csv donde se encuentran los escalones de velocidad y el tiempo de duración de estos. Envía al microcontrolador el archivo elegido, y este manda el comando para que se implementen los escalones establecidos.
 - Modo Ai1: Este modo envía y recibe información del microcontrolador al variador, tiene dos funcionamientos
 - Control desactivado: la planta se encuentra a lazo abierto y puede ser ingresada una frecuencia estimada.
 - Control activado: este método se utiliza como lazo de control cerrado, durante su funcionamiento se retroalimenta velocidad por lo que ante perturbaciones el sistema se establece en la velocidad de referencia configurada.

El formato de los datos enviados de la aplicación al microcontrolador es un vector de los datos separados por comas en formato “string” como se observan en la tabla SKFAJSF, mientras que la referencia de cada elemento son:

que se envían a través de la aplicación en formato “string” al microcontrolador son mostrados en la Tabla

D_0	,	D_1	,	D_2	,	D_3	,	D_4	,	D_5	,	D_6	,	D_7	,
-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---

- D_0 : señal para que se encienda o se apague el motor desde la aplicación.
- D_1 : valor de velocidad o frecuencia de referencia.
- D_2 : señal para que el microcontrolador ingrese al modo “Ai1- Control activado”
- D_3 : señal para que el microcontrolador ingrese al modo “Ai1”
- D_4 : señal para que el microcontrolador se reinicie luego de alguna falla.
- D_5 : señal de falla externa que detiene el motor.
- D_6 : largo del vector ingresado por el archivo .csv.
- D_7 : vector de velocidades de referencias y tiempos de los escalones obtenidos del .csv.

7.2. Bloque Hardware

Para llevar a cabo la implementación final del “hardware”, se procedió a realizar mediante el programa “Proteus” el diseño de una única placa uniendo los bloques anteriormente utilizados (Sección 5) (Figura 7.3). Esta nueva placa fue realizada por la máquina de prototipado “MARCA protomart” perteneciente al Departamento de Electrónica de la Universidad. Una vez que se obtuvo la plaqueta se soldó componentes nuevos y se reutilizaron elementos utilizados durante la implementación del prototipo.

En la figura WWW se observa la placa terminada. Este nuevo prototipo elimina ruidos eléctricos ocasionados al utilizar cables para interconectar bloques y sensores.

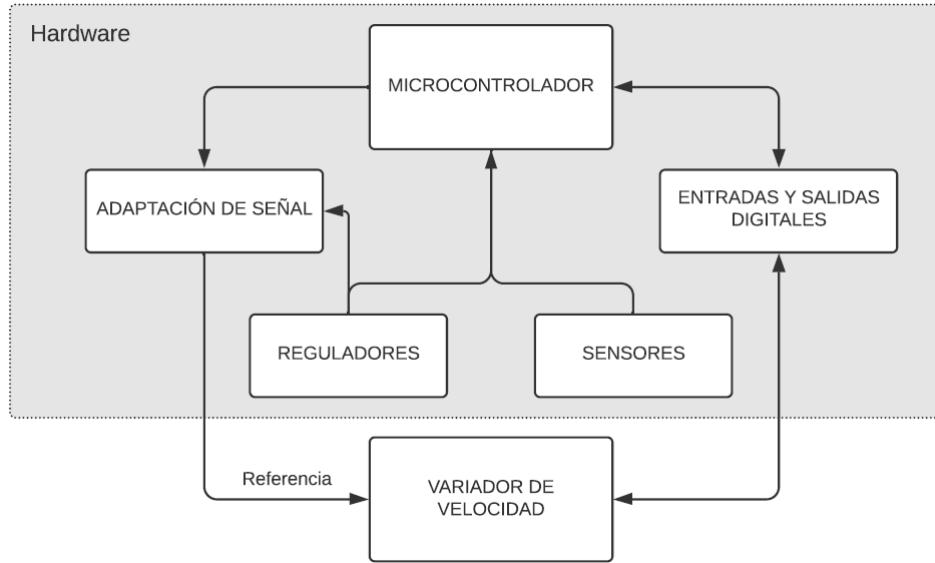


Figura 7.3: Diagrama en bloques del hardware

7.3. Costos

El proyecto se comenzó a mediados del año 2019, por lo que los sensores fueron comprados en esa fecha en el exterior. En la tabla 7.1 se observan los gastos totales para realizar la implementación final del HARDWARE con valores actualizados a agosto de 2021. El valor del dólar (agosto de 2021) incluye 30

tabla guardada cualquier cosa

7.4. Consumo de corriente

NUEVA PLACA

7.5. Planos eléctricos

NOSE

8. Recomendaciones futuras

- Utilización de un cable UTP mallado para mejorar interferencias.
- Realización de una aplicación bluetooth para Android.
- Automatización de las perturbaciones que se pueden realizar sobre el túnel de viento.
- Utilización el sensor de TH fuera de la caja contenedora para minimizar el error de la estimación de la velocidad.
- Realización de una nueva GUI según necesidades del laboratorio.
- Realización de una nueva parte del programa del microcontrolador para que puedan ser cargadas otros tipos de funciones de velocidad (rampas, funciones cuadráticas, etc)
- Adquisición de un nuevo motor con tecnología actual y lograr bajar el tiempo de los parámetros de aceleración y desaceleración (F35 y F36).

9. Conclusión

Beneficios y contra - pruebas realizadas

10. Bibliografía

Referencias

- [1] Yunus A Cengel. “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”. En: (2006).
- [2] Federico Licci y Lucas Rivera. “Estudio fluidodinámico de túnel de viento en condiciones reales de uso y validación experimental”. En: *Proyecto final de Ingeniería Mecánica, Departamento de Mecánica, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco* (2020).
- [3] Jorge Pomares y Ángel Martínez Bueno. “Sistemas de Control Automático. Identificación experimental de sistemas (curso 2010-2011)”. En: *Sistemas de Control Automático* (2011).
- [4] Daniel Barila y Daniel Zucas. “Desarrollo y construcción de un túnel de viento de 30kW”. En: *Proyecto de investigación, Consejo de investigación CIUNPAT, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco* (1993).
- [5] Long Shenq. *Manual de instalación y programación : Variador de velocidad LS650 para motor de C.A.*
- [6] INTI. “Cálculo de la densidad del aire húmedo”. En: *Procedimientos del INTI* (2015).

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio (USD)</i>	<i>Precio (\$)</i>	<i>Sub-Total (\$)</i>
1	BME280	2.4		432
1	MPXV7002	7.41		1334
1	SI7021	3.25		585
1	envio internacional	4.6		828
1	envio Arg		160	160
10	Resistencia 4.7k		5	50
5	Resistencia 10k		5	25
5	Resistencia 100k		5	25
4	Resistencia 20k		7.5	30
2	Resistencia 22k		5	10
2	Preset 1k		180	360
1	Preset 500		180	180
1	Preset 10k		180	180
1	Diodo Zener 1N4740 (10V)		25	25
1	Diodo Zener 1N4001		15	15
2	Capacitor 0.33uF		35	70
2	Capacitor 0.1uF		15	30
1	Capacitor 220uF-16V		20	20
3	Capacitor 10nF		15	45
5	Transistor BC548		30	150
1	CI 74LS126		200	200
1	CI LM358		70	70
1	Borneras x2		180	180
1	Borneras x3		200	200
1	Fuente conmutada		1500	1500
1	Regulador 7810		180	180
1	Regulador 7815		180	180
1	ADC ADS1115		800	800
	Pines M/H/zócalos		490	490
	Arduino NANO		900	900
	Caja contenedora			
Total				\$ 9253.8

Tabla 7.1: Gastos de implementación