



# 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

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>7</b>
<b>3. Túnel de viento</b>	<b>8</b>
3.1. Historia del Túnel UNPSJB . . . . .	8
3.1.1. Motor y Variador de velocidad . . . . .	9
3.1.2. Instrumentación utilizada . . . . .	10
<b>4. Pruebas iniciales</b>	<b>11</b>
4.0.1. Direcciones I2C . . . . .	12
4.1. Ecuación velocidad del aire . . . . .	12
4.1.1. Comparación de densidades . . . . .	13
4.2. Características del flujo . . . . .	14
4.2.1. Cálculo de número de Reynolds . . . . .	14
4.2.2. Flujo turbulento . . . . .	16
4.3. Filtros . . . . .	18
4.4. Error observado . . . . .	18
<b>5. Desarrollo</b>	<b>20</b>
5.1. Captura de datos por puerto serie . . . . .	21
5.2. Estimación de la planta . . . . .	22
5.2.1. Diagrama de trabajo . . . . .	22
5.2.2. Método de estimación . . . . .	23
5.3. Control . . . . .	24
<b>6. Pruebas realizadas</b>	<b>26</b>
6.1. Estimación de la densidad ante cambios de Temperatura y Humedad . . . . .	26
6.2. comparación de la frecuencia vista en el panel con el valor de PWM . . . . .	28
6.3. Contrastación de diferencia de presión . . . . .	28
6.4. Contrastación de velocidades . . . . .	28
6.5. Perturbaciones . . . . .	30
<b>7. Implementación</b>	<b>30</b>
7.1. Planos eléctricos . . . . .	30
7.2. Implementación física final . . . . .	30
7.3. Consumo de corriente . . . . .	30
7.4. HMI . . . . .	30
7.5. Costos . . . . .	31
<b>8. Recomendaciones futuras</b>	<b>31</b>
<b>9. Conclusión</b>	<b>31</b>
<b>10.Bibliografia</b>	<b>31</b>

# Índice de figuras

2.1. Diagrama del objetivo . . . . .	7
3.1. Tunel uso recreativo . . . . .	8
3.2. Clasificación túneles . . . . .	8
3.3. Tunel UNPSJB . . . . .	9
3.4. Motor y variador de velocidad . . . . .	10
3.5. Instrumentos calibrados . . . . .	10
4.1. Esquema de placa con sensores utilizados . . . . .	13
4.2. Diámetro hidráulico . . . . .	15
4.3. Dimensiones de la cámara de ensayos en mm . . . . .	15
4.4. Perforaciones dentro de la cámara de ensayos y "Panal de abeja" . . . . .	16
4.5. Fluctuaciones . . . . .	17
4.6. Fluctuaciones en velocidades medidas . . . . .	17
4.7. Datos y diversos filtros . . . . .	18
4.8. Datos y filtro mediana . . . . .	18
4.9. Curva aceleración y desaceleración . . . . .	19
5.1. Placa de control . . . . .	20
5.2. Terminales de control . . . . .	20
5.3. Placa adaptadora de señal . . . . .	21
5.4. Pantalla Processing . . . . .	22
5.5. Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta . . . . .	22
5.6. Diagrama en bloques . . . . .	23
5.7. Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados . . . . .	23
5.8. Estimación de planta . . . . .	24
5.9. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 1 . . . . .	24
5.10. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2 . . . . .	25
5.11. Ejemplo de prueba realizada . . . . .	26
5.12. Comparación de PI, escalon de subida . . . . .	26
5.13. Comparación de PI, escalon de bajada . . . . .	27
5.14. Comparación 3 sistemas PI . . . . .	27
6.1. Contrastación de diferencia de presión . . . . .	28
6.2. VER QUE POINER . . . . .	30
6.3. VER QUE POINER okkkk . . . . .	31
6.4. Compuertas utilizadas como perturbaciones . . . . .	32
6.5. Fotos del reóstato (izquierda) y del banco de resistencias (derecha) . . . . .	32

# Índice de tablas

4.1. Factor de escala . . . . .	12
4.2. Comparación de densidades calculadas . . . . .	14
5.1. Valores de PID's . . . . .	25
6.1. Densidad del aire ante cambios de TH . . . . .	27
6.2. del aire ante cambios de TH . . . . .	28
6.3. Comparación de Diferencia de presión . . . . .	29

# 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**, utilizando las mediciones de las variables como se nombró en un principio.

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 para utilizar un variador de velocidad (adquirido por el Laboratorio de Fluidos). Además se espera realizar una interfaz gráfica para un mejor manejo y control del sistema.

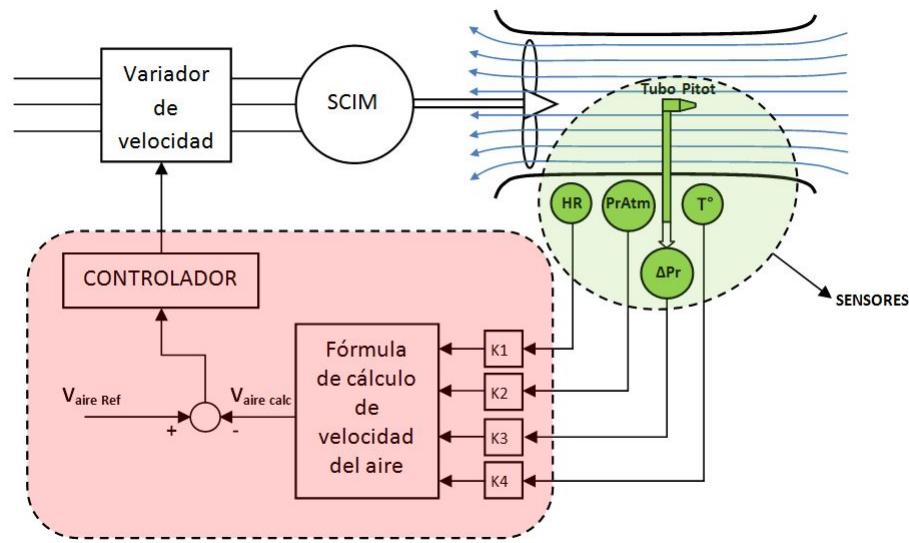


Figura 2.1: Diagrama del objetivo

### 3. Túnel de viento

Un 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.

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 uso recreativo

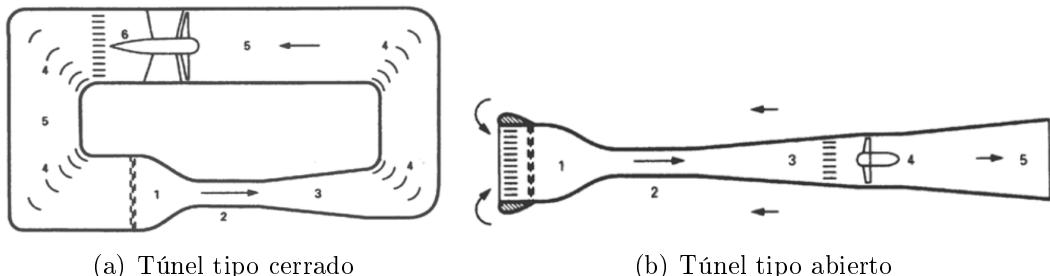


Figura 3.2: Clasificación túneles

#### 3.1. Historia del Túnel UNPSJB

<sup>1</sup> 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 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 m<sup>2</sup>.

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.

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



Figura 3.3: Tunel UNPSJB

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.

### 3.1.1. 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 control de aceleración, frenado, seguridad, control del torque y operaciones que mejoran la eficiencia energética.

El motor que se utiliza para hacer funcionar el ventilador corresponde a la marca **AEG**, de 30 kW de potencia<sup>[4]</sup>. Mientras que el variador de velocidad, es de la marca **Long Shenq**.

El variador cuyo modelo es **LS650-4045** para una potencia de 45kW con salida trifásica es capaz de ser controlado por entradas de corriente, tensión, PID interno, potenciómetro o de forma manual con botones en su panel frontal.



(a) Motor y ventilador durante la construcción del túnel



(b) Variador de velocidad LS650

Figura 3.4: Motor y variador de velocidad

### 3.1.2. Instrumentación utilizada

Los instrumentos normalmente utilizados en conjunto con el túnel del viento, que están calibrados y certificados por el INTI son:

- **AXD 650 ALNOR**

Instrumento micromanómetro utilizado para medir la diferencia de presión.

- **Testo 435 TESTO**

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



(a) AXD 650

(b) testo 435

Figura 3.5: Instrumentos calibrados

## 4. Pruebas iniciales

### 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 100, 400 y 1000 kbits/s.

### Arduino

El **Arduino Uno** es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip **Atmega328P** y desarrollado por **Arduino**. La placa está equipada con conjuntos de pines de E/S digitales y analógicas que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos.

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

Para comenzar con las pruebas, lo primero que se realizó es la conexión de diversos sensores en una protoboard. Se obtuvieron datos para elegir cuál convenía utilizar, ya que se hicieron pruebas con varios sensores de temperatura, humedad y presión atmosférica.

Cabe destacar que para la comunicación de estos sensores se utilizó **comunicación I2C**, que permitió, a través de dos líneas de comunicación, conectar, en una primera instancia, 5 elementos al mismo bus.

Las variables que se necesitó medir correspondían a diferencia de presión, temperatura, humedad y presión atmosférica, para esto se consiguió diversos sensores para realizar pruebas eligiendo elementos que generaban la menor variación de THP respecto a los instrumentos que posee el laboratorio y estos fueron los siguientes:

- **BME280:** Sensor de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.
- **SI7021:** Sensor de temperatura y humedad relativa.
- **MPXV7002:** Sensor de presión diferencial.
- **ADS1115:** Convertidor analógico digital 16bits utilizado en conjunto con MPXV7002.

Se realizaron diversas pruebas que sirvieron 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), para este proyecto se utilizó la parte positiva de los valores por lo que la resolución estaba establecida por los 2V de rango y 2kPa. Estos datos se ingresaron al programa **Arduino** a través de un conversor **ADS 1115** con comunicación I2C.

No se utilizó el ADC interno del microcontrolador Arduino Uno ya que es de 10 bits y el externo de 15 bits más un bit de signo, este mismo 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 UNO 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.

Ejemplo Factor de escala de Arduino UNO:

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

Ejemplo Factor de escala de ADS115:

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

En la siguiente tabla se tiene un resumen de los valores posibles de factor de escala para ADS1115.

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 4.1: Factor de escala

Aunque la mayor referencia sea de 6,1444 V, el ADS1115 sólo puede medir el valor de alimentación (VDD) más 0,3 V por sus pines analógicos. ver porq pin ingresa la señal en proteus. Por lo tanto, si alimentamos el ADS1115 con 5V, sólo podremos medir tensiones por los pines analógicos hasta 5V + 0,3V es decir, 5,3V. Lo mismo ocurriría si alimentamos con 3,3V. En este caso el máximo sería 3,6V. (con que alimentamos? ver en proteus)  
En el caso de este proyecto, se utilizó un valor de PGA de 1, tomando como voltaje de referencia 4,096V.

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

#### 4.0.1. Direcciones I2C

### 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.

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

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

$$Z = 1 - \frac{p}{T} \cdot [a_0 + a_1t + a_0t^2 + (b_0 + b_1t)x_v + (c_0 + c_1t)x_v^2] + (d + x_v^2) \frac{p^2}{T^2} \quad (3)$$

dónde:

- **p** [Pa] presión atmosférica medida,
- **t** [ $^{\circ}\text{C}$ ] temperatura medida,

- $T$  [K] temperatura absoluta ( $T=t + 273,15$  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 dentro del mismo archivo.

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

Tanto las ecuaciones de densidad ec.(1) y la ecuación del cálculo de velocidad ec.(4) se desarrolló dentro del programa de **Arduino** para observar como dato final la velocidad del aire.

#### 4.1.1. 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 4.1).

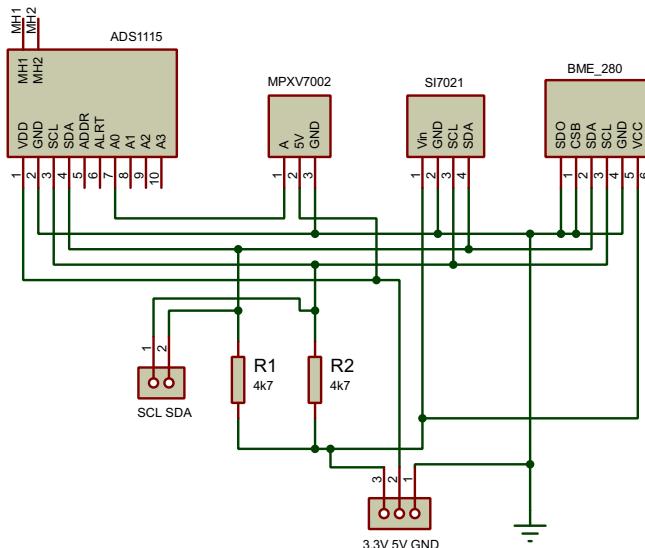


Figura 4.1: Esquema de placa con sensores utilizados

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 4.2.

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 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%.

## 4.2. Características del flujo

Una inspección cuidadosa del flujo en una tubería revela que el flujo de fluidos es currentilíneo a bajas velocidades, pero se vuelve caótico conforme 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 también desordenado. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; más bien, sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento. La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos.

### 4.2.1. Cálculo de 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:

- $\rho$  [ $kg/m^3$ ] densidad del aire
- $v$  [ $m/s$ ] velocidad del aire
- $D_h$  [ $m$ ] diámetro hidráulico

<b>Fecha</b>	<b>Obs.</b>	<b>T [°C]</b>		<b>H [%]</b>		<b>P [Pa]</b>		<b>Dens. calculada [kg/m³]</b>		<b><math>e_r</math> [%]</b>
		<b>I</b>	<b>S</b>	<b>I</b>	<b>S</b>	<b>I</b>	<b>S</b>	<b>I</b>	<b>S</b>	
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 4.2: Comparación de densidades calculadas

-  $\mu$  [ $kg/m.s$ ] viscosidad dinámica del aire

La viscosidad dinámica del fluido es un valor obtenido del anexo del libro *Mécanica de Fluidos* [1], mientras que el valor de densidad fue calculado con los valores de temperatura, humedad y presión de un día dado como se muestra en la sección 4.1.1. El diámetro hidráulico de una tubería circular coincide con el diámetro interno, en tanto que para una tubería de sección rectangular, este es dependiente del valor de sus lados (Figura 4.2) [2].

El número de Reynolds se calculó con una velocidad de 6m/s, al ser proporcional a la velocidad si esta aumenta el valor será mayor.

$$R_e = \frac{1,193 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,86 \text{ m} \cdot 6 \text{ m/s}}{0,000018 \text{ kg/m.s}} = 345521 \quad (6)$$

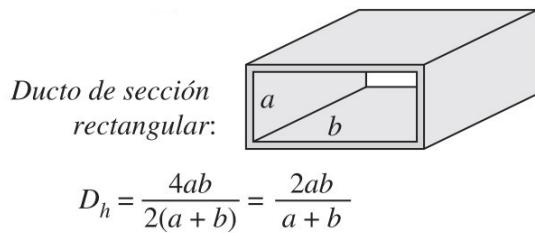


Figura 4.2: Diámetro hidráulico

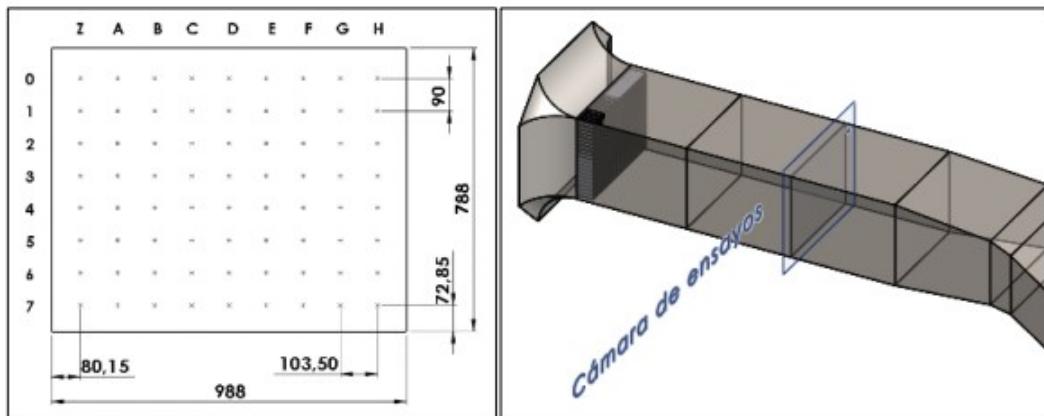


Figura 4.3: Dimensiones de la cámara de ensayos en mm

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 de viento este valor siempre es mayor correspondiendo a un flujo turbulento.

#### 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 de viento. 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 posible es la existencia de orificios en la parte inferior de la cámara que son utilizados para la colocación de instrumentos, pero esto genera la no uniformidad del flujo (Figura 4.4).



Figura 4.4: Perforaciones dentro de la cámara de ensayos y "Panal de abeja"

La figura 4.5 muestra, en este caso, las fluctuaciones alrededor de una velocidad promedio dentro de un tiempo específico. El valor promedio de una propiedad en alguna posición se determina cuando se promedia sobre un intervalo de tiempo que sea suficientemente grande, de modo que el valor promediado en tiempo se estabilice en una constante. En consecuencia, la fluctuación promediada en tiempo es cero.

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.

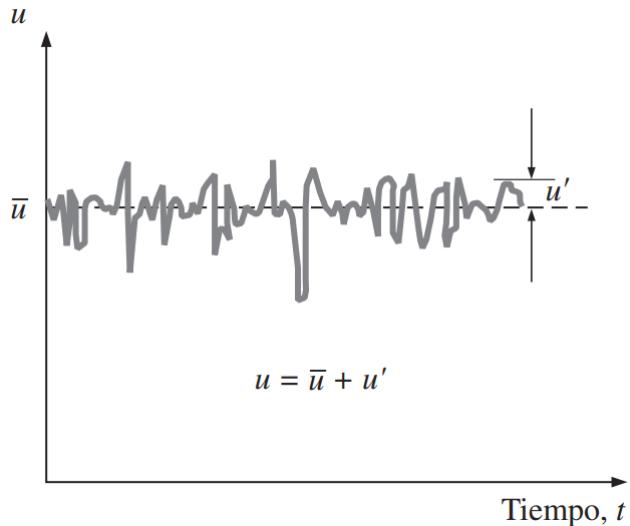


Figura 4.5: Fluctuaciones

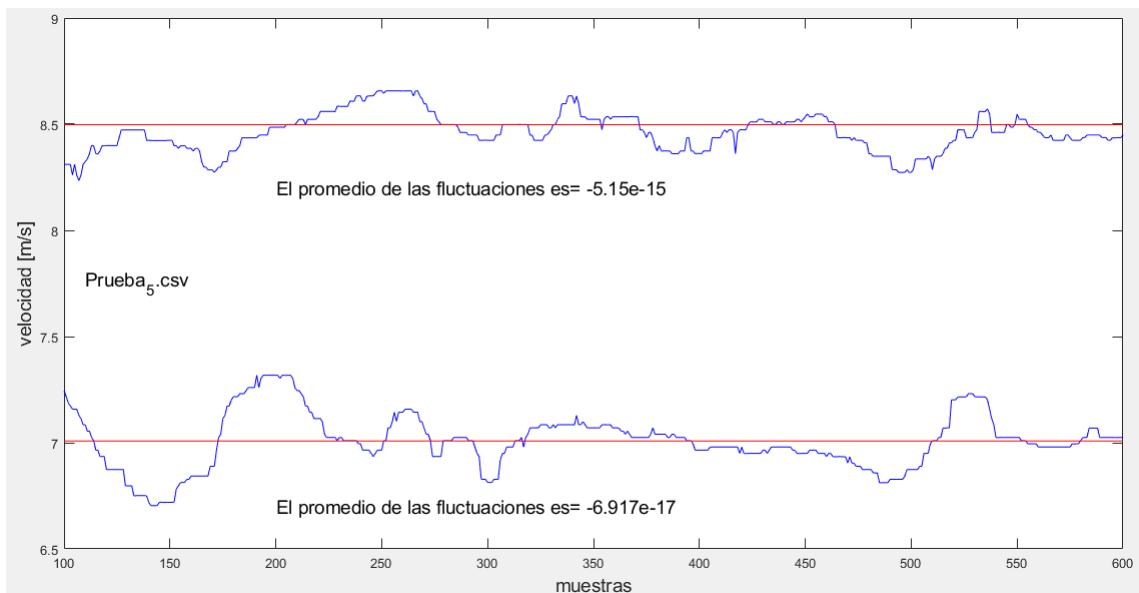


Figura 4.6: Fluctuaciones en velocidades medidas

### 4.3. 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 4.7).

Luego de varias pruebas, se eligió un filtro de mediana (Figura 4.8) con una ventana

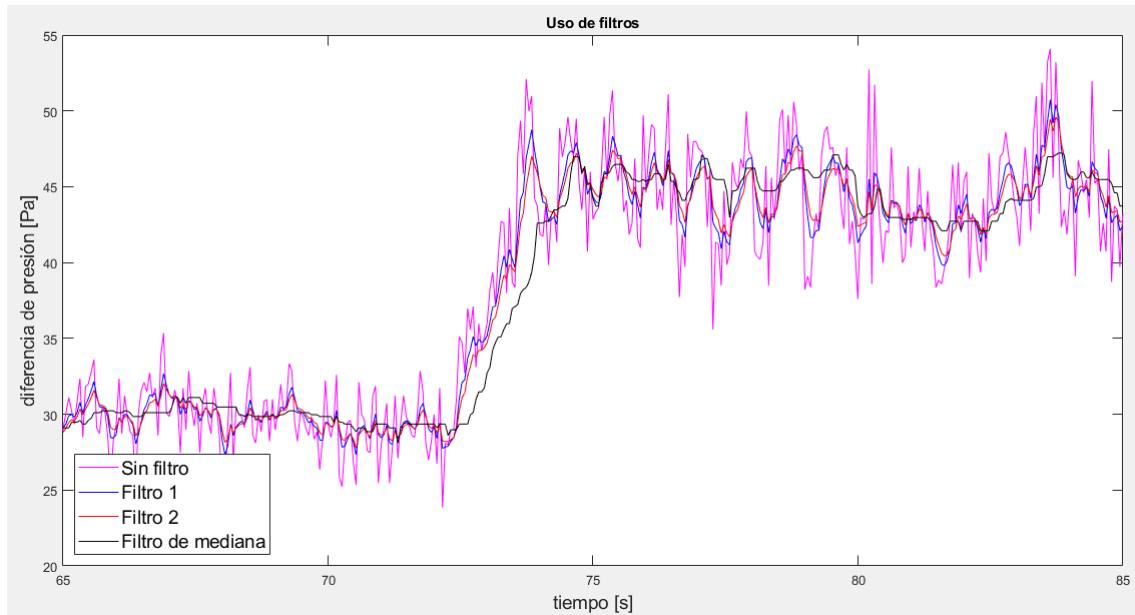


Figura 4.7: Datos y diversos filtros

40, que producía menor ruido en la velocidad del aire. Se implementó en el programa de **Arduino** utilizando la una función preestablecida.

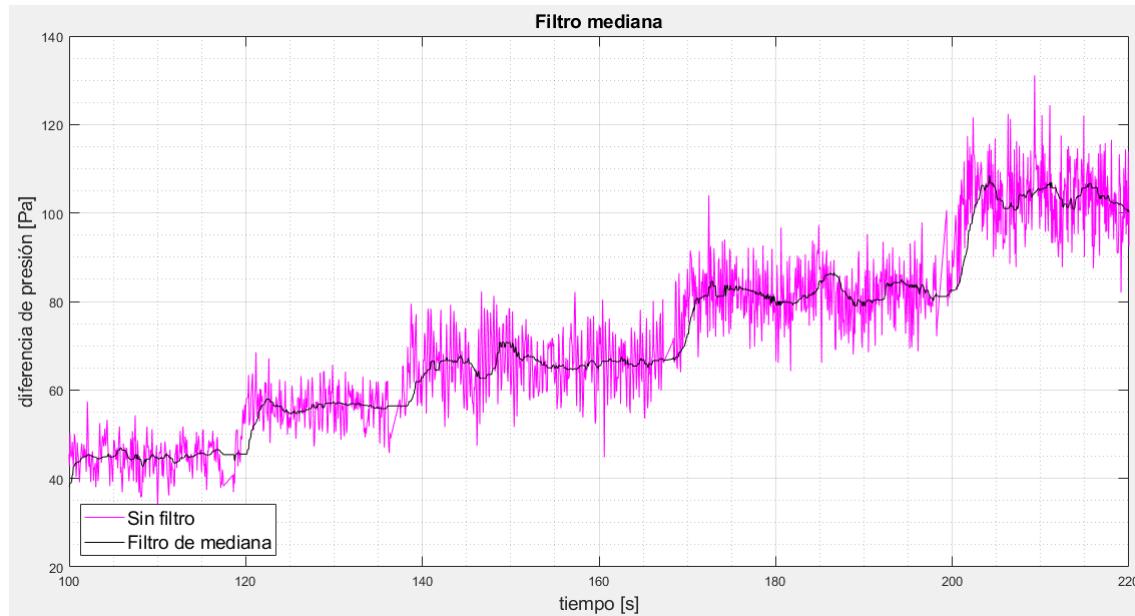


Figura 4.8: Datos y filtro mediana

#### 4.4. Error observado

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

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.

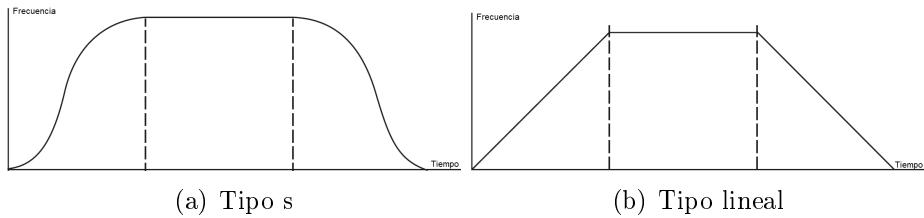


Figura 4.9: Curva aceleración y desaceleración

## 5. Desarrollo

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.

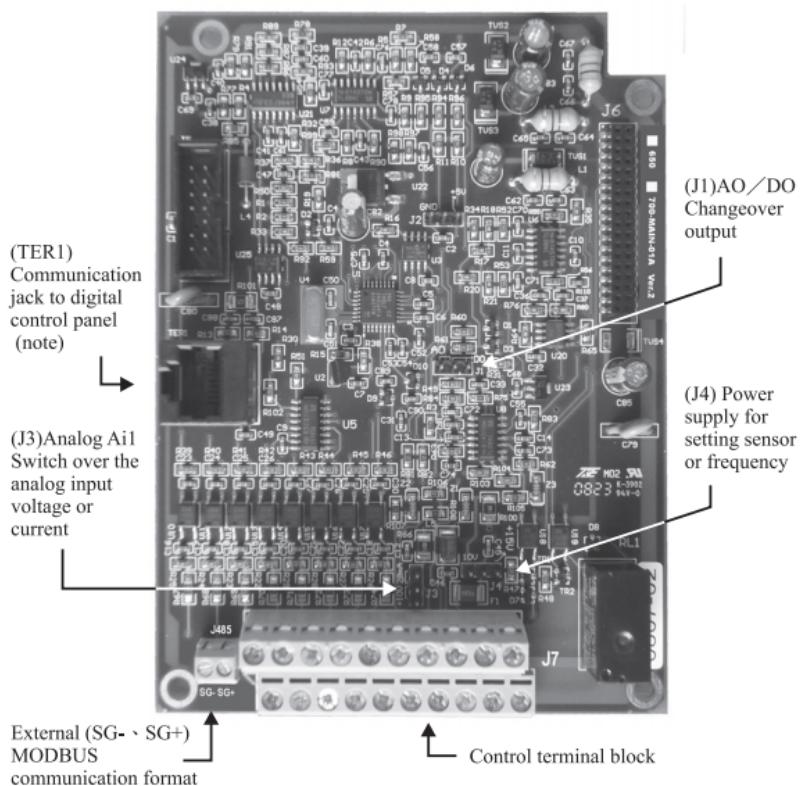


Figura 5.1: Placa de control

SG-	SG+	Di1	Di3	Di5	Di7	DCM	Do	Ai1	Ao	E	Tc
		Di2	Di4	Di6	Di8	COM	Ai2	+10V	AVG	Ta	Tb

Figura 5.2: Terminales de control

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 filtro generada por nosotros.

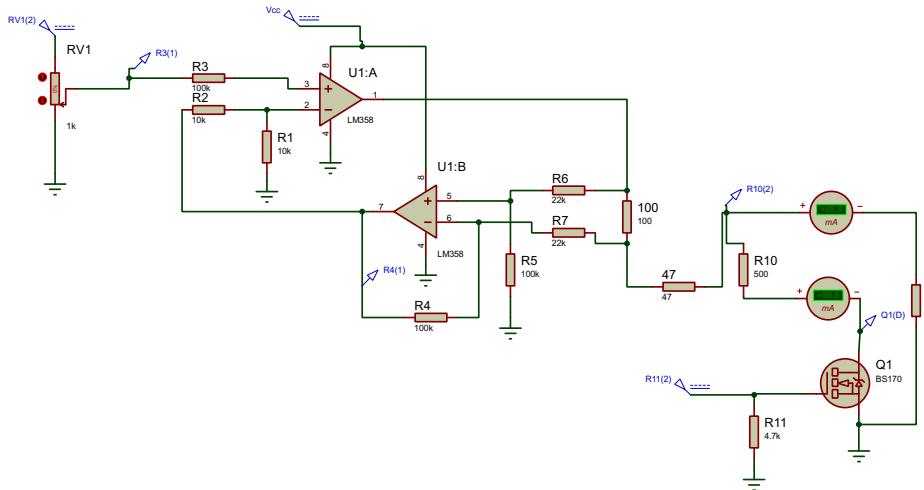


Figura 5.3: Placa adaptadora de señal

## 5.1. Captura 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 capturar los datos, primeramente se utilizó Matlab, como se necesitó visualizar los valores en tiempo real y luego guardar la tabla con vectores, este programa producía errores en la capturación de datos. Para solucionar el inconveniente anteriormente nombrado, se utilizó un código generado en Processing. Con este código, se capturó los valores, se observaba el valor numérico estimado de la velocidad y se lograba ingresar el valor del escalón requerido para tomar la planta. (Figura 5.4)



Figura 5.4: Pantalla Processing

## 5.2. Estimación de la planta

### 5.2.1. Diagrama de trabajo

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

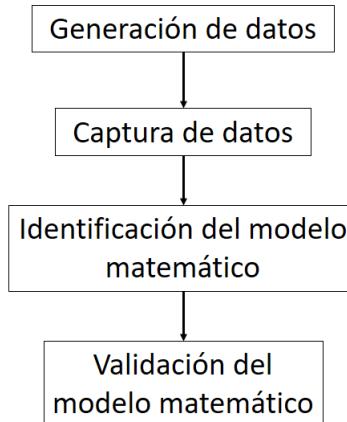


Figura 5.5: Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta

**Generación de datos:** se hizo diversas pruebas para obtener la mayor cantidad de información en la respuesta.

**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 numéricos para la estimación.

**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 por escalones.

### 5.2.2. Método de estimación

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

La Figura 5.6 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.

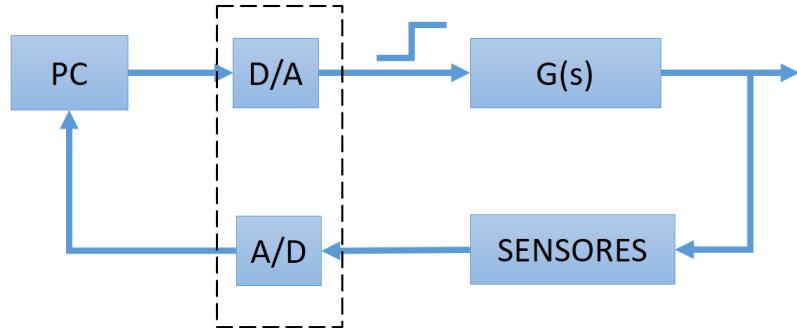


Figura 5.6: Diagrama en bloques

Para realizar la estimación de la planta se obtuvo y guardó tablas de datos con Processing, generando por la interfaz distintos escalones de entrada para obtener varias mediciones. En la figura 5.7 se observan los datos de dos columnas de las tablas anteriormente generadas.

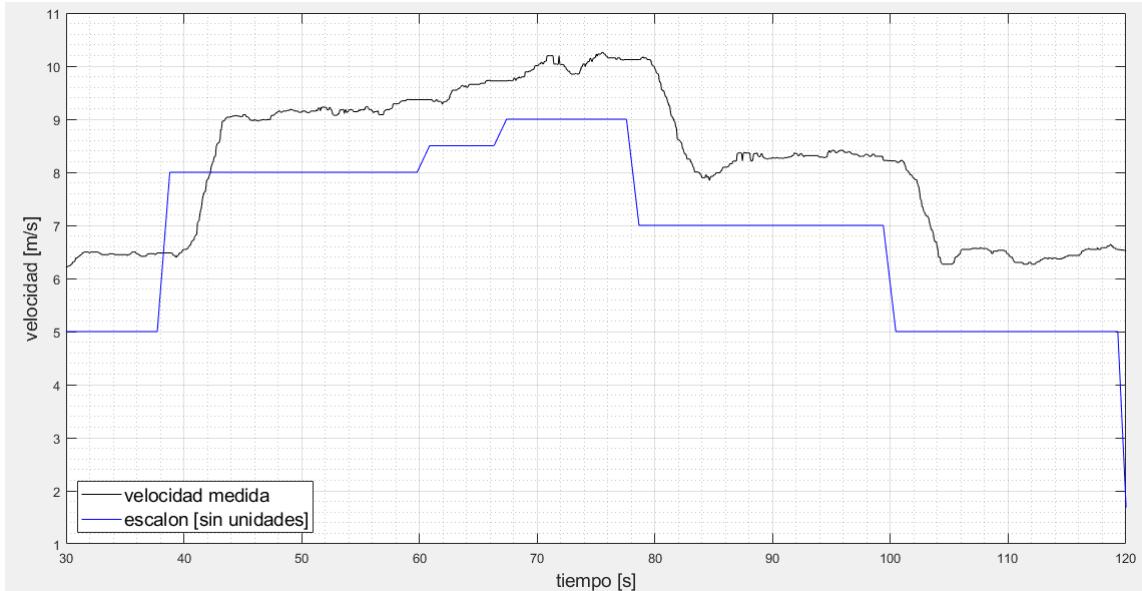


Figura 5.7: Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados

Seguidamente, se procedió a generar un nuevo código de Matlab donde se cargaron los valores obtenidos de la figura (a) 5.8 para realizar la estimación de la planta a través del método "Strejc" [3].

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

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,02483}{s^2 + 1,846s + 1,535} \quad (7)$$

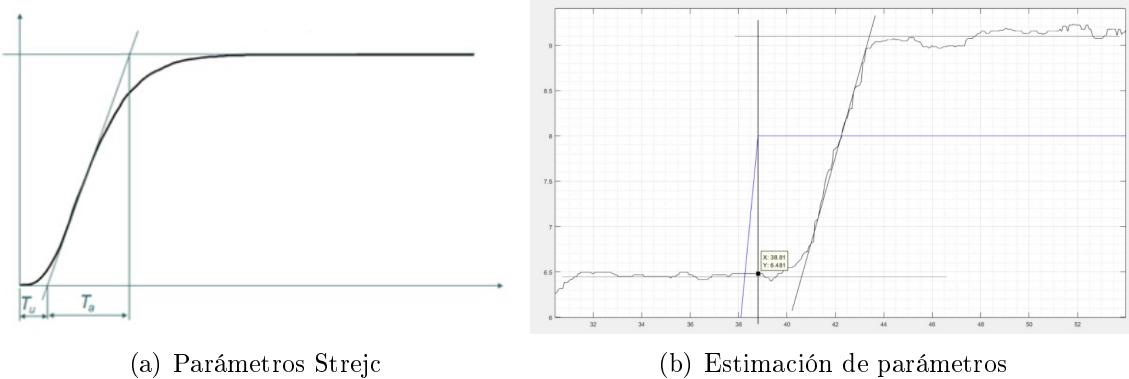


Figura 5.8: Estimación de planta

Para corroborar la elección de la planta se generó un archivo en *Simulink* generando como entrada escalones que se colocaron en el sistema. Luego, el otro código de matlab obtenía estos valores y realizaba la comparación de lo estimado con los valores reales obtenidos en diversas mediciones (Figura 5.9 y Figura 5.10).

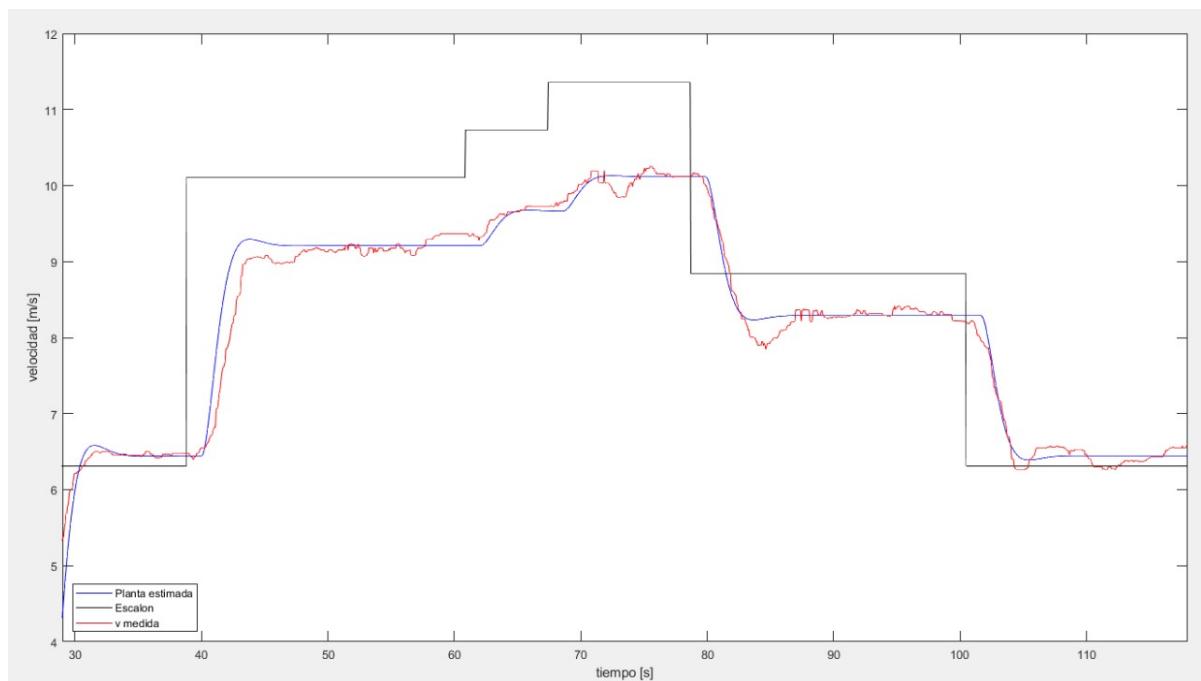


Figura 5.9: Corroboration of plant estimation. Example 1

### 5.3. 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

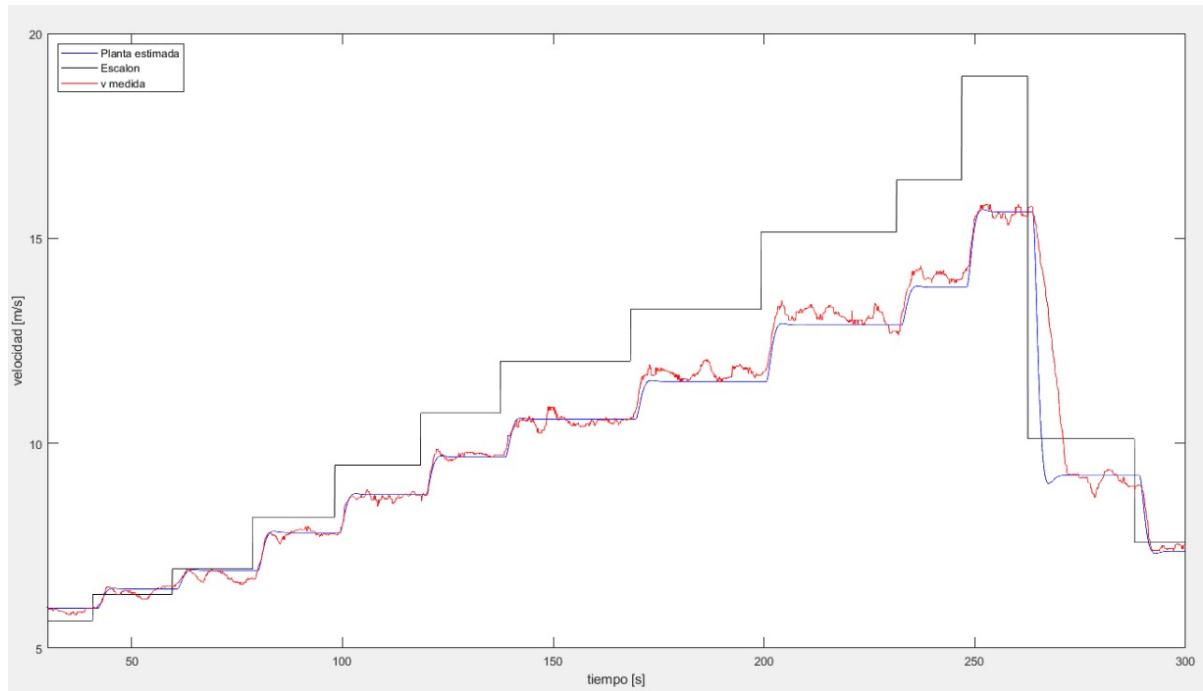


Figura 5.10: Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2

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

Tabla 5.1: Valores de PID's

Uniendo todos los resultados obtenidos por los distintos PI utilizados se puede realizar las comparaciones para un escalón donde la velocidad sube (figura 5.12) y otro donde la velocidad baja (figura 5.13).

En la figura 5.14 se pueden observar el sistema que genera mayor sobrepico, un sistema con una respuesta mas lenta, y un sistema con respuesta intermedia.

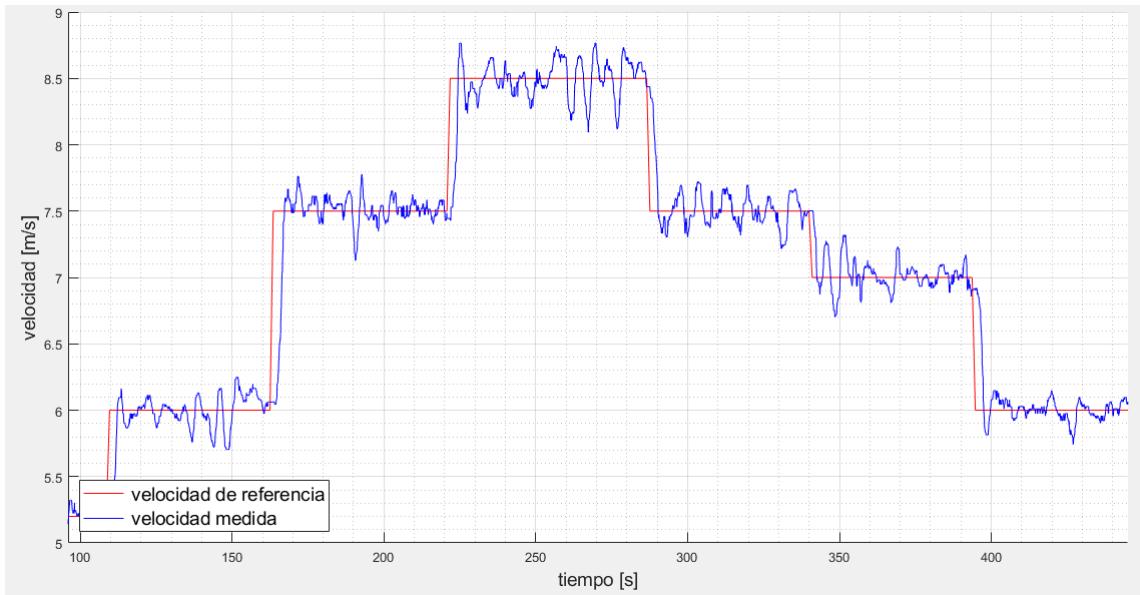


Figura 5.11: Ejemplo de prueba realizada

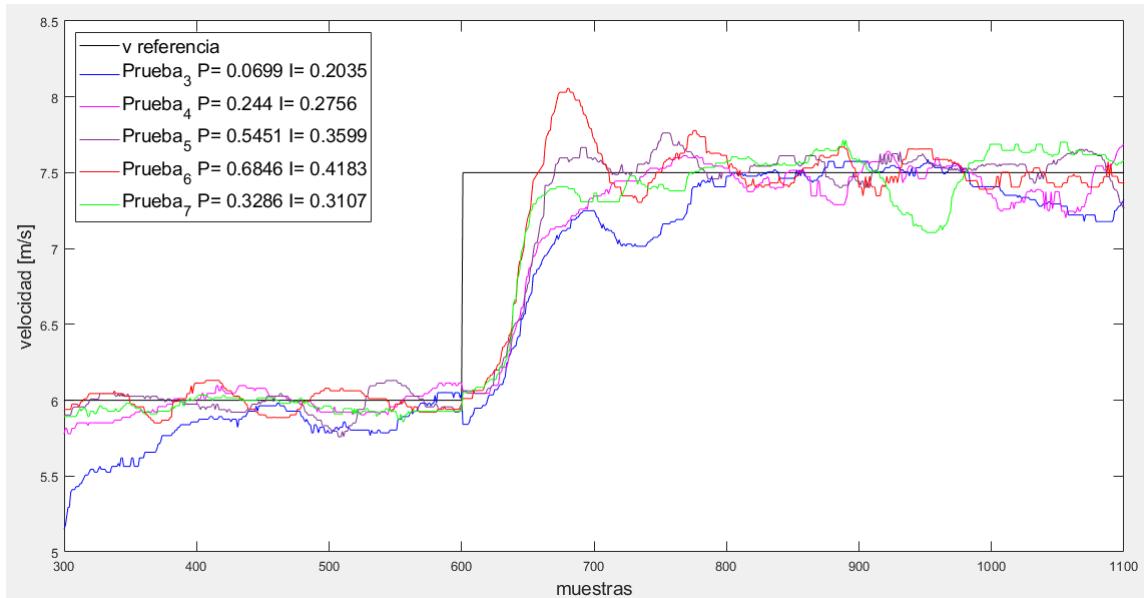


Figura 5.12: Comparación de PI, escalon de subida

## 6. Pruebas realizadas

### 6.1. 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 6.1 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)

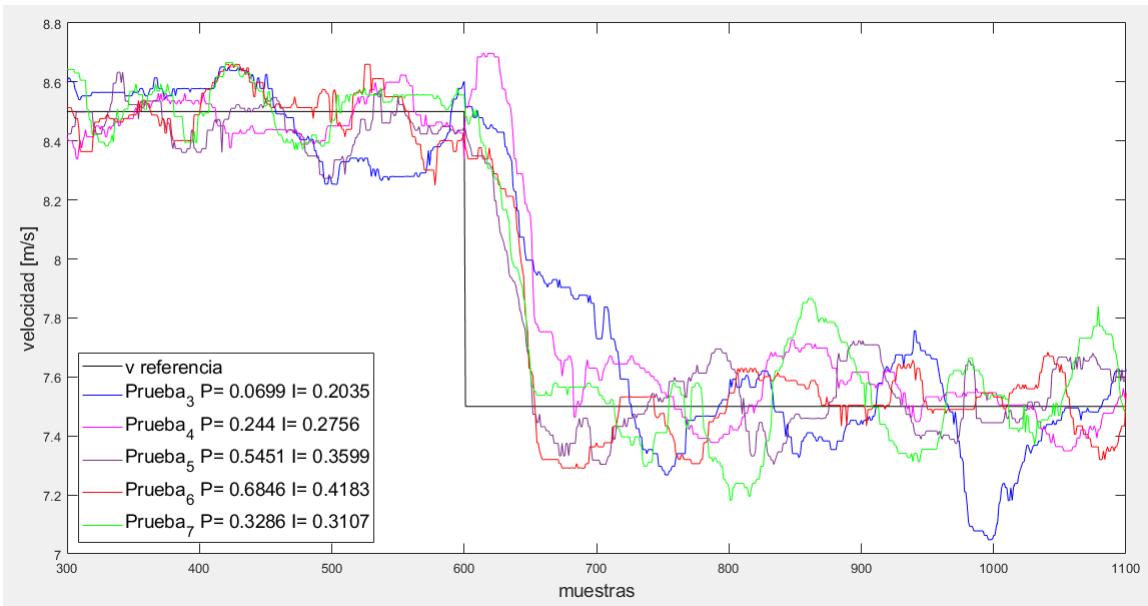


Figura 5.13: Comparación de PI, escalon de bajada

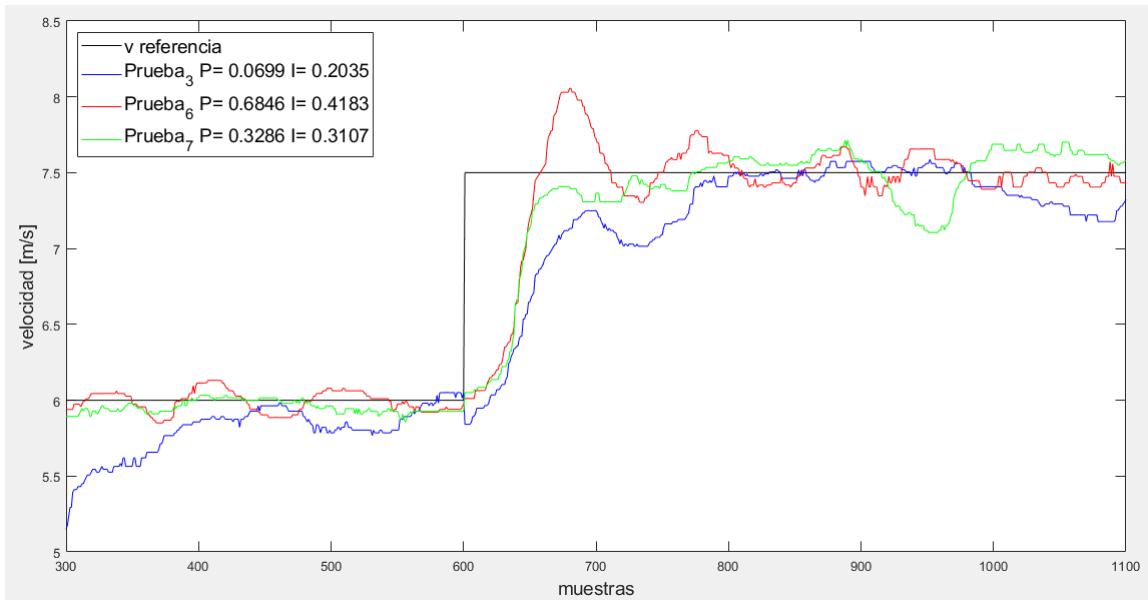


Figura 5.14: Comparación 3 sistemas PI

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 6.1: Densidad del aire ante cambios de TH

Si se calcula la velocidad del aire con la formula 4 y con los datos de la tabla 6.1 utilizando una diferencia de presión constante de  $32Pa$  se puede observar que la diferencias de velocidades son inferiores a  $0,03m/s$  (tabla 6.2) 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 6.2: del aire ante cambios de TH

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

## 6.3. 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 6.3, generando luego un gráfico de puntos con las muestras tomadas, observando que el error es mayor para diferencias de presión mayores a 100 Pa 6.1.

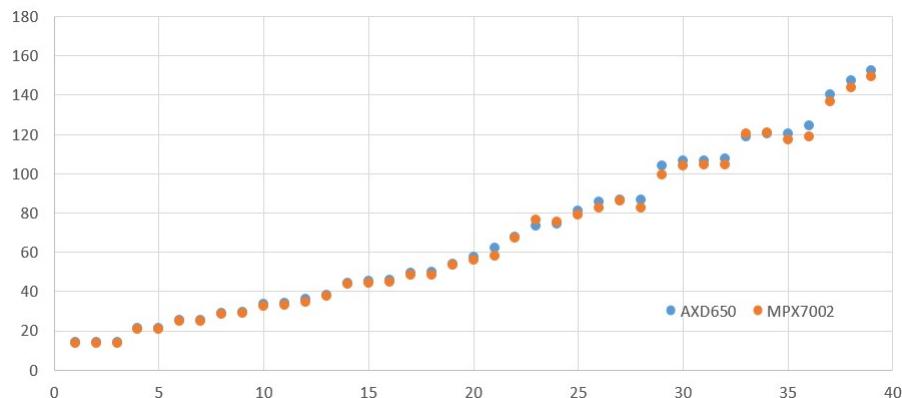


Figura 6.1: Contrastación de diferencia de presión

## 6.4. 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)

Diferencia de presión [Pa]		
<b>AXD650</b>	<b>MPX7002</b>	<b>E<sub>r</sub></b>
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 6.3: Comparación de Diferencia de presión

## 6.5. 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<sup>[4]</sup> cuando el laboratorio no poseía variador y era utilizado el motor con un reóstato (Figura 6.5).

Para realizar estas pruebas de funcionamiento primero se encendió el túnel, se comenzó a guardar valores y se controló la velocidad del aire en  $6 \text{ m/s}$ , 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.

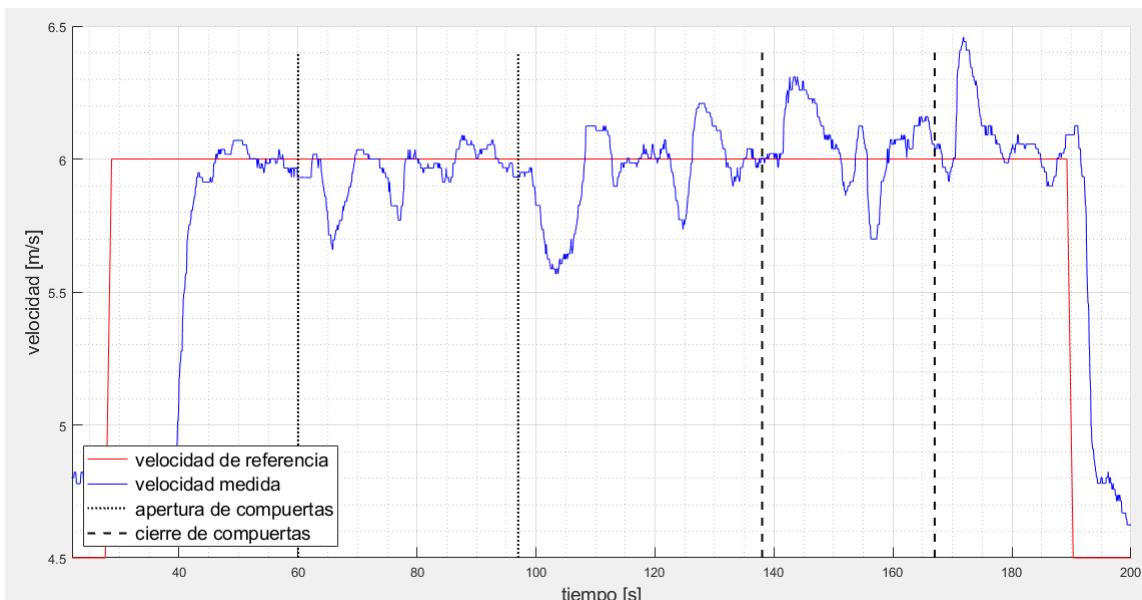


Figura 6.2: VER QUE POINER

## 7. Implementación

### 7.1. Planos eléctricos

NOSE

### 7.2. Implementación física final

### 7.3. Consumo de corriente

NUEVA PLACA

### 7.4. HMI

NOSE

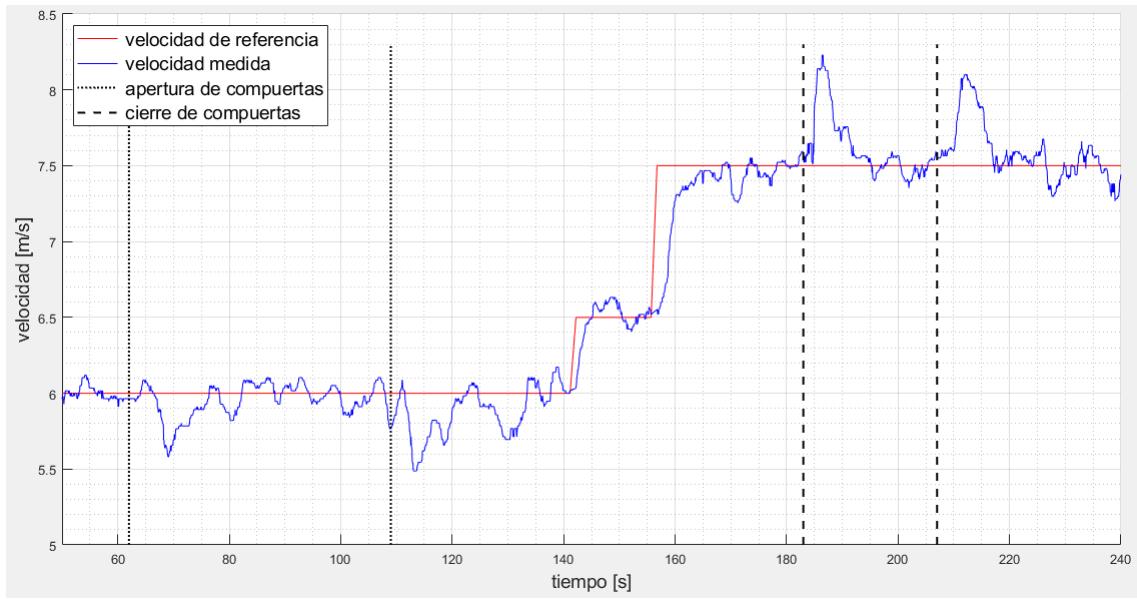


Figura 6.3: VER QUE POINER okkkk

## 7.5. Costos

## 8. Recomendaciones futuras

## 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).

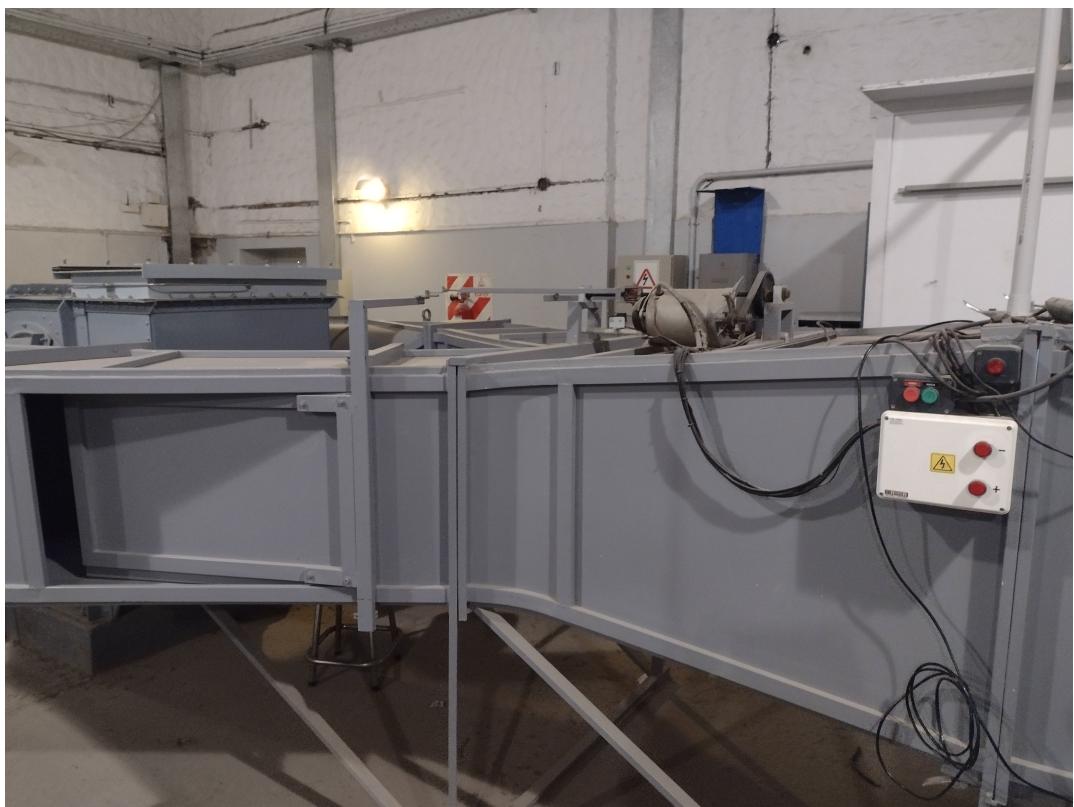


Figura 6.4: Compuertas utilizadas como perturbaciones



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