



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 al realizar el proyecto final de carrera en contexto de "Pandemia" por *Covid-19*.

Índice

1. Introducción	8
2. Objetivo	9
3. Túnel Aerodinámico	10
3.1. Clasificación	10
3.2. Túnel UNPSJB	10
3.2.1. Historia	10
3.2.2. Motor y Variador de velocidad	11
3.2.3. Instrumentación	12
4. Fluido: Aire	13
4.1. Ecuación velocidad del aire	13
4.2. Características del flujo	14
4.2.1. Estimación del número de Reynolds	14
4.2.2. Flujo turbulento	15
5. Desarrollo	16
5.1. Microcontrolador, sensores y comunicación	16
5.2. Adquisición de datos por puerto serie	18
5.3. Filtros	19
5.3.1. Filtro de mediana	20
5.4. Error observado	20
5.5. Lazo de corriente	22
5.6. Estimación de la planta	23
5.6.1. Diagrama de trabajo	23
5.6.2. Método de estimación	24
5.7. Control	27
5.7.1. Implementación en μ C	30
5.7.2. Pruebas de control	31
6. Pruebas realizadas	34
6.1. Comparación de densidades	34
6.2. Fluctuaciones de velocidad	35
6.3. Estimación de la densidad ante cambios de Temperatura y Humedad	35
6.4. Contrastación de diferencia de presión	36
7. Implementación	38
7.1. Bloque Aplicación	38
7.2. Bloque Hardware	41
7.3. Costos	41
8. Recomendaciones futuras	43
9. Conclusión	44
10.Bibliografia	45

A. Descargas	46
B. Manual de usuario de la aplicación	47
B.1. Requerimientos del sistema	47
B.2. Puesta en marcha	47
B.3. Gráfico en tiempo real	47
B.3.1. Visibilidad de las señales en tiempo real	47
B.3.2. Escala	48
B.3.3. Límite del eje vertical	48
B.4. AutoFucion	48
B.5. Ail	49
B.5.1. Control desactivado	49
B.5.2. Control activado	49
B.6. Encendido/ apagado del motor	50
B.6.1. Panel frontal	50
B.6.2. Aplicación	50
B.7. Guardado de datos	50
B.8. Lectura de datos obtenidos	50
B.9. Falla externa	51
C. Processing	52
D. Código Arduino	55
E. Código Processing	56
F. Código Matlab	57
G. Modelo de placa	58

Índice de figuras

2.1. Diagrama del objetivo	9
3.1. Clasificación túneles	10
3.2. Tunel vertical de uso recreativo	10
3.3. Tunel UNPSJB	11
3.4. Motor y variador de velocidad	12
3.5. Instrumentación calibrada	13
4.1. Diámetro hidráulico	14
4.2. Dimensiones de la cámara de ensayos en mm	15
4.3. Perforaciones dentro de la cámara de ensayos y "Panal de abeja"	16
4.4. Fluctuaciones alrededor de una velocidad media	16
5.1. Sensores utilizados	17
5.2. Pantalla Processing	19
5.3. Datos y diversos filtros	19
5.4. Datos y filtro mediana	20
5.5. Curva aceleración y desaceleración	21
5.6. Terminales de control	22
5.7. Placa electrónica del variador de velocidad	22
5.8. Placa adaptadora de señal	23
5.9. Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta	23
5.10. Estimación de planta	24
5.11. Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados	25
5.12. Estimación de planta	25
5.13. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 1	26
5.14. Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2	27
5.15. Lazo de control	27
5.16. Ejemplo de prueba realizada	28
5.17. Comparación de PI, escalon de subida	28
5.18. Comparación de PI, escalon de bajada	29
5.19. Comparación 3 sistemas PI	29
5.20. Datos Experimentales y Simulados para la <i>Prueba6</i>	30
5.21. Datos Experimentales y Simulados para la <i>Prueba7</i>	30
5.22. Compuertas utilizadas como perturbaciones	31
5.23. Fotos del reóstato (izquierda) y del banco de resistencias (derecha)	32
5.24. Comportamiento del sistema ante perturbaciones. Ejemplo 1	33
5.25. Comportamiento del sistema ante perturbaciones. Ejemplo 2	33
6.1. Esquema de placa con sensores utilizados	34
6.2. Fluctuaciones en velocidades medidas	35
6.3. Contrastación de diferencia de presión	36
7.1. Bloques implementados	38
7.2. Bloque <i>Aplicación</i>	38
7.3. Aplicación creada	40
7.4. Bloque <i>Hardware</i>	41
B.1. Puerto activado. Visualización de los valores del μ C.	47
B.2. Gráfico en tiempo real	48
B.3. Archivos dentro de la carpeta "autofun"	49
B.4. Aplicación en modo Autofunción	49

B.5. Guardado de datos	50
B.6. Archivo .csv generado	51
C.1. Esquema del microcontrolador	52
C.2. Esquema de la placa adaptadora	52
C.3. Esquema de entradas/ salidas	53
C.4. Esquema de la placa reguladora	53
C.5. Esquema de sensores	54

Índice de tablas

5.1. Factor de escala	18
5.2. Valores de PID's	28
6.1. Comparación de densidades calculadas	34
6.2. Densidad del aire ante cambios de TH	36
6.3. del aire ante cambios de TH	36
6.4. Comparación de Diferencia de presión	37
7.1. Datos adquiridos desde el μ C	39
7.2. Datos enviados al μ C	40
7.3. Gastos de implementación	42
B.1. Formato .csv	49

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, para cambiar 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 cumplir con el objetivo, es necesario adaptar la acción de control que será la entrada de referencia para indicarle al variador de velocidad, la frecuencia con la que debe trabajar.

Además se espera realizar una interfaz gráfica para un mejor manejo y control del sistema.

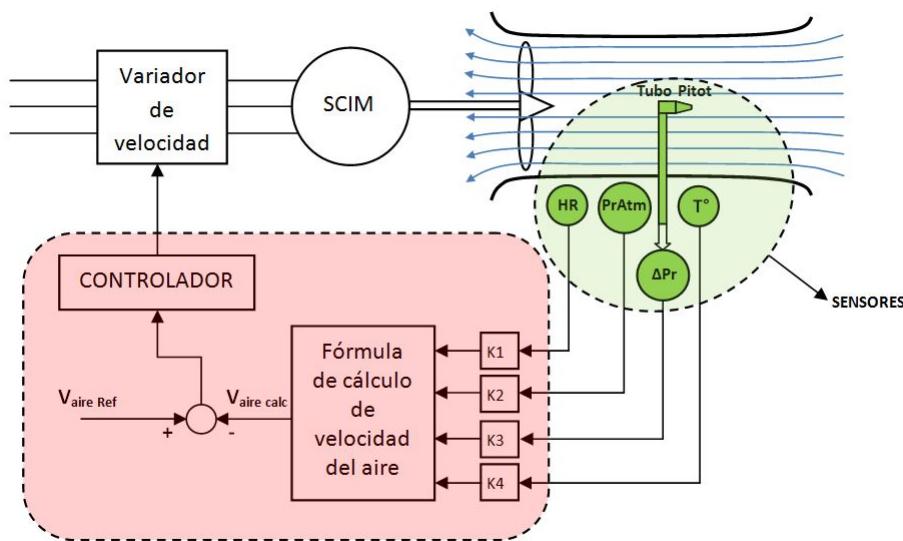


Figura 2.1: Diagrama del objetivo

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.

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: 3.2 y 3.1)

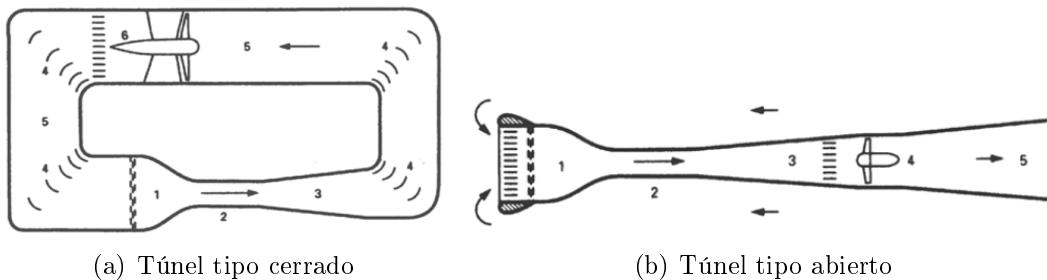


Figura 3.1: Clasificación túneles



Figura 3.2: Tunel vertical de uso recreativo

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 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.

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[2]. 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 [3].

Al utilizar 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 cojinetes. Al ser un motor que no posee rodamientos, sino cojinetes, estos necesita funcionar en un rango de velocidades y con cierta aceleración necesaria para la luz entre elementos sea tal para que no se produzca contacto entre el eje y rotor.



(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.



(a) AXD 650 (b) Testo 435

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 (Ecuación 1) en función de la presión, temperatura y humedad atmosférica [4].

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

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

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

dónde:

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

Finalmente, la ecuación 1 se utiliza 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 por 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:

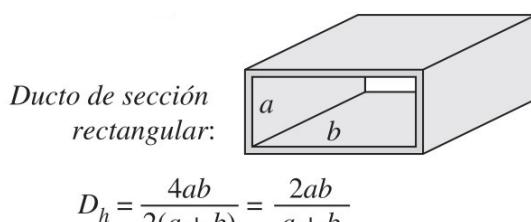
- ρ [kg/m^3] densidad del fluido
- v [m/s] velocidad del fluido
- D_h [m] diámetro hidráulico
- μ [$kg/m.s$] viscosidad dinámica del fluido

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* [5].

El *diámetro hidráulico* de una tubería de sección rectangular es dependiente del valor de sus lados (Figura 4.1 y 4.2) [6].

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



$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

Figura 4.1: Diámetro hidráulico

Si se reemplaza los valores se obtiene:

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

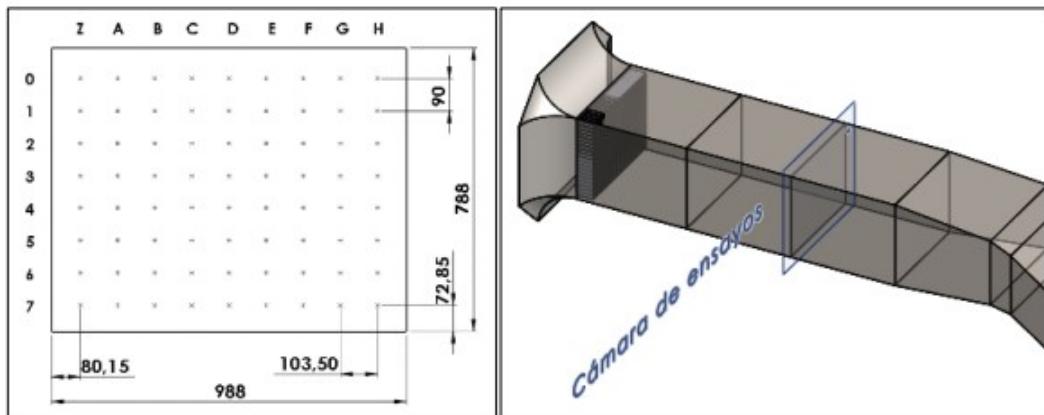


Figura 4.2: Dimensiones de la cámara de ensayos en mm

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 este valor siempre será mayor.

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. [5]

Aun mientras 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).

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

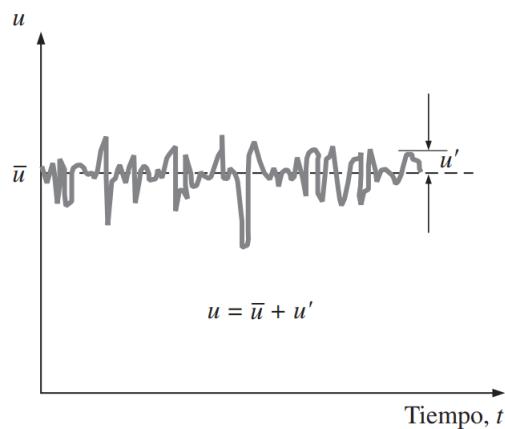


Figura 4.4: Fluctuaciones alrededor de una velocidad media

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 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 mediante dos líneas, con 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 para lograr el objetivo (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 (Figura 3.5).

Sensores elegidos

- **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

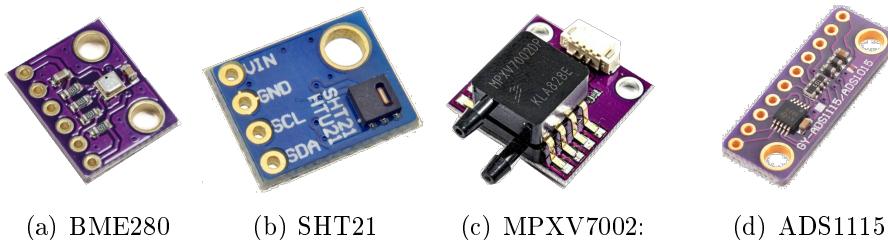


Figura 5.1: Sensores utilizados

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.

El sensor MPXV7002 posee una salida de voltaje analógico, por lo que 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 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 ±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:

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

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 igual a 1, cuya tensión de referencia es 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

[7]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. En consecuencia, después de cierta cantidad de pruebas realizadas, se tornó indispensable observar los valores adquiridos, como la velocidad estimada en tiempo real.

Como solución para el inconveniente anteriormente nombrado, se realizó una primera versión (Figura 5.2) de una interfaz gráfica generada con Processing. Este código fue capaz de adquirir datos desde el microcontrolador en tiempo real y mostrarlos tanto gráfica como numéricamente.

Para realizar la estimación de la planta (Sección 5.6), fue necesario enviar escalones de señal al variador de velocidad a través del microcontrolador. Esto fue posible al ingresar valores numéricos por teclado que eran enviados al μC para generar la respectiva señal. Luego ésta es ingresada al variador por un lazo de corriente. Ver (Sección 5.5).

Al presionar una tecla específica configurada por los comandos, el programa guardaba los datos adquiridos durante la prueba en un archivo .csv para luego ser observadas con Matlab.

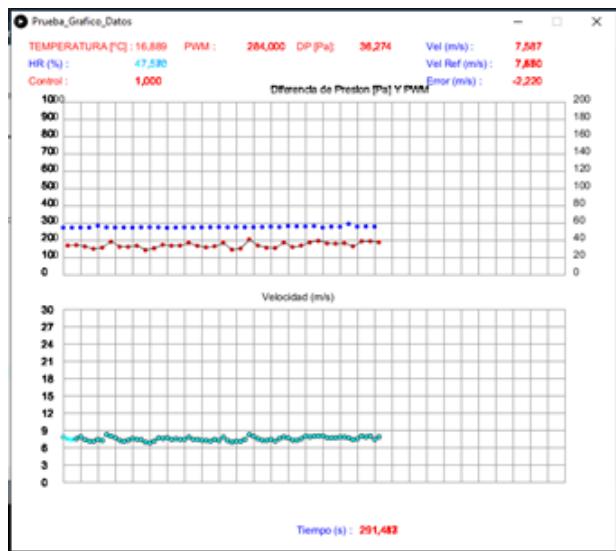


Figura 5.2: Pantalla Processing

5.3. Filtros

Filtro digital

Es una operación matemática que toma una secuencia de números (señal de entrada) y la modifica para producir otra (señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características.

Una vez que se procedió a tomar diversos valores de velocidad estimada, se notó necesario la implementación de un filtro a causa de las fluctuaciones alrededor de una velocidad media (Figura 6.2). Para esto se utilizó varias bibliotecas preestablecidas de **Arduino** con las cuales se realizó la implementación de diversos filtros en el μ C, con diferentes parámetros para posterior comparación (Figura 5.3).

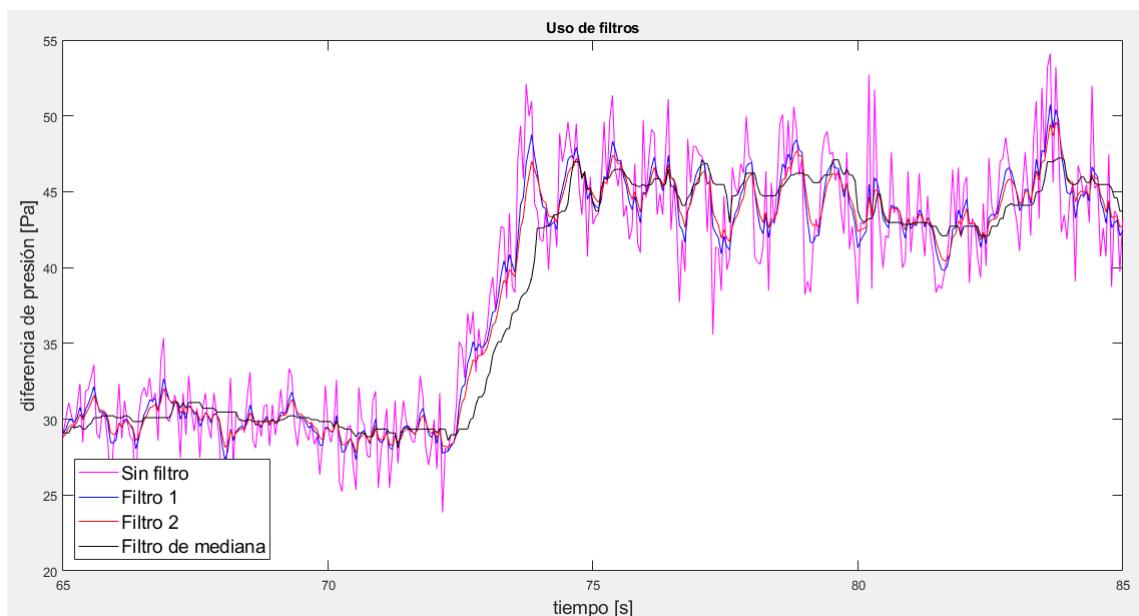


Figura 5.3: Datos y diversos filtros

5.3.1. Filtro de mediana

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, y sustituir cada dato por la mediana de una ventana de “N” datos.

Al observar y realizar la comparación de los filtros, se decidió utilizar el filtro de mediana (Figura 5.4), con una ventana igual a 40 muestras, que producía menor ruido en la estimación del aire. Como consecuencia del uso de este filtro, la señal se vio desfasada aproximadamente 1 segundo..

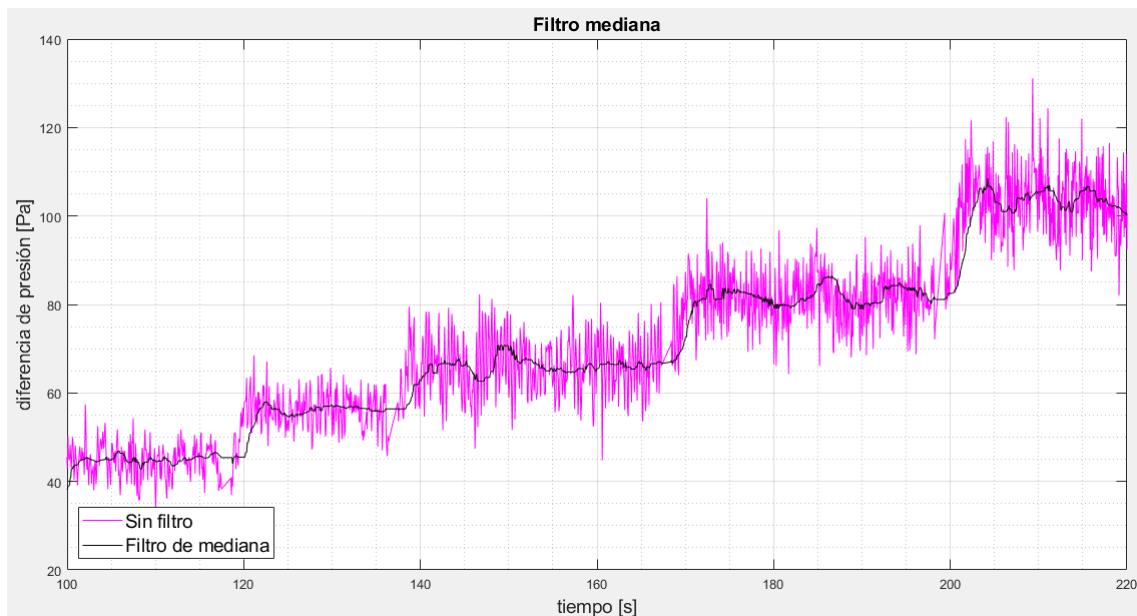


Figura 5.4: Datos y filtro mediana

5.4. Error observado

Al utilizar el potenciómetro frontal del variador de velocidad u otro modo de funcionamiento distinto al panel digital frontal, se originaba un error en la aceleración o desaceleración. Al hacer las averiguaciones pertinentes, esto se debió a una configuración interna del variador y a las características propias del motor.

Si el variador se utiliza con el panel digital frontal, la curva de aceleración y desaceleración sigue una “s” (Figura 5(a)) y no produce un cambio brusco en la velocidad del motor, en cambio, para el uso del potenciómetro u otro modo de funcionamiento la curva es lineal (Figura 5(b)). Para revertir esto, se modificó los parámetros del tiempo de aceleración y desaceleración del variador a 20 segundos.

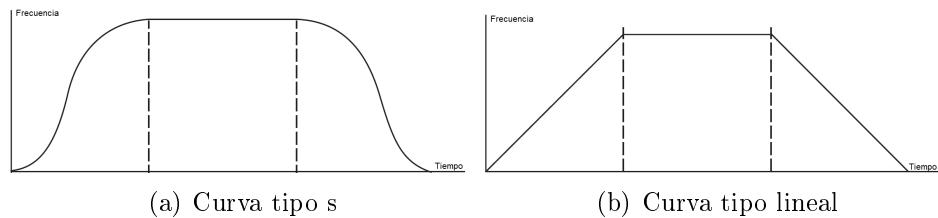


Figura 5.5: Curva aceleración y desaceleración

5.5. Lazo de corriente

Se realizó la modificación de los parámetros nombrados en la sección 5.4 y se corroboró que el error no aparecía nuevamente al cambiar el modo de funcionamiento del variador.

Para realizar la comunicación del microcontrolador con el variador de velocidad se decidió utilizar el modo de funcionamiento de entrada analógica de dos hilos (**Ai1**) ingresados por la bornera de la figura 5.6. Este modo analógico puede ser configurado de 0-10V o 0-20mA a través del “jumper J3” (Figura 5.7).

Se optó por la utilización un lazo de corriente, este tiene ventajas sobre el lazo de tensión ya que es más estable en largas distancias y más inmune a los ruidos eléctricos e interferencias electromagnéticas. Normalmente, se utilizan lazos de corriente de 4-20mA para poder observar si hubiera fallas en el circuito, por lo que fue necesario adaptar la señal generada por el μ C para seguir el estándar.

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

Figura 5.6: Terminales de control

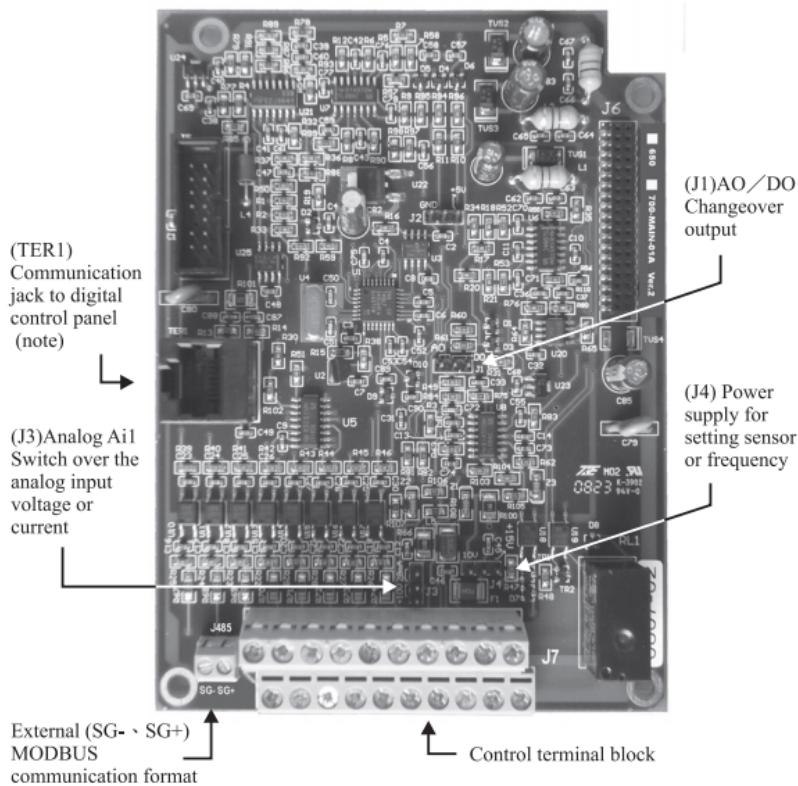


Figura 5.7: Placa electrónica del variador de velocidad

La señal analógica para realizar el control del variador de velocidad fue generada por una señal PWM estipulada a través de la biblioteca *TimerOne* del μ C. Con esta biblioteca se configuró la frecuencia de la señal PWM, la cual fue de 25 kHz.

Para la señal PWM generada, se utilizó el Pin 9 del μ C, y se ajustó el ciclo de trabajo entre 0 y 1023 ya que era la resolución máxima que disponía la biblioteca. El Pin 9 de salida

tiene un rango de tensión de 0 a 5V, por lo que fue necesario realizar la transformación de esta señal a una señal de corriente a través una “placa adaptadora de señal” (Figura 5.8). Esta placa, tiene como entrada el valor de tensión anteriormente nombrado y genera una señal de salida de 0 a 20mA. Por medio de un parámetro del variador, se modificó la señal para adaptarla al estándar de 4 a 20mA.

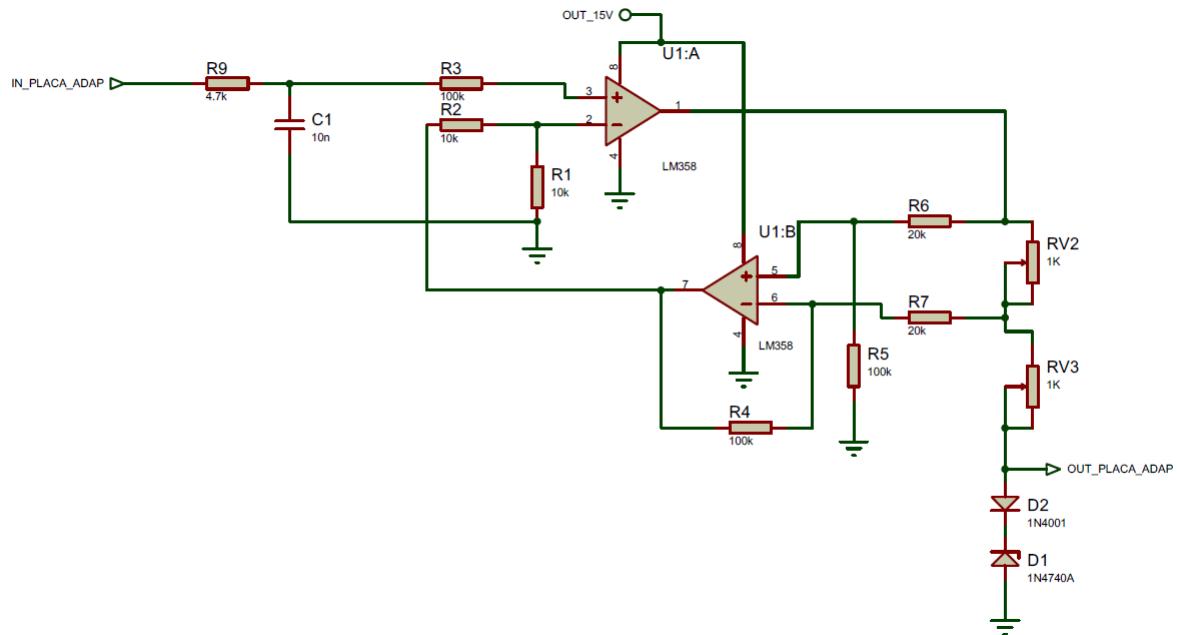


Figura 5.8: Placa adaptadora de señal

5.6. Estimación de la planta

5.6.1. Diagrama de trabajo

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

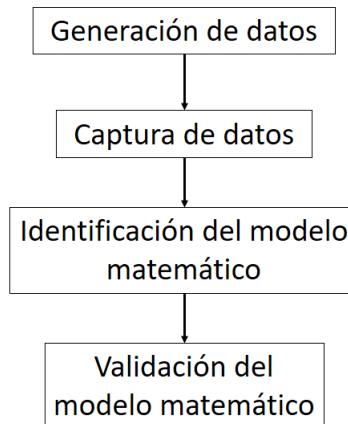


Figura 5.9: Diagrama de bloques del procedimiento de modelado de la planta

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.

5.6.2. Método de estimación

Una vez que se determinó el valor de la ventana del 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. $G(s)$ es el conjunto del túnel de viento, variador de velocidad y motor.

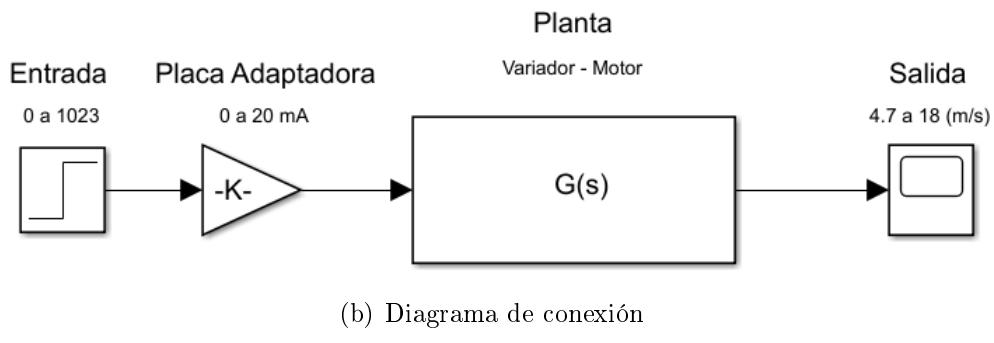
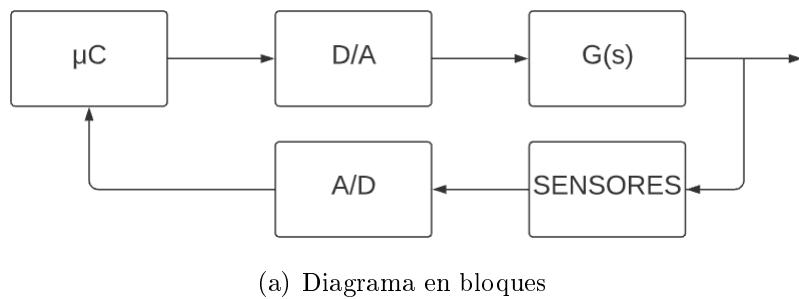


Figura 5.10: Estimación de planta

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 de varias mediciones. En la figura 5.11 se observa los valores de velocidad y los escalones que se realizaron durante una prueba generada para obtener los parámetros necesarios para la estimación de la planta.

Seguidamente, se procedió a generar un nuevo código de Matlab donde se cargó los datos obtenidos de la prueba (Figura 5.11) y con ellos se observaron las características necesarias 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*" [8].

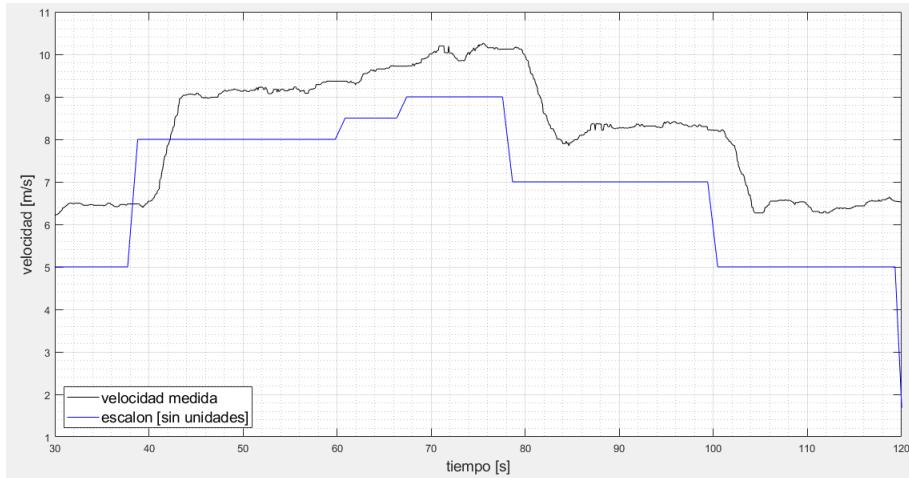
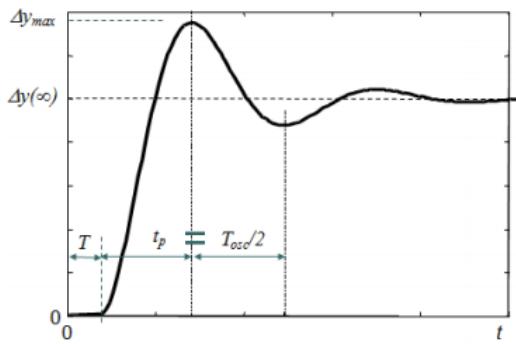
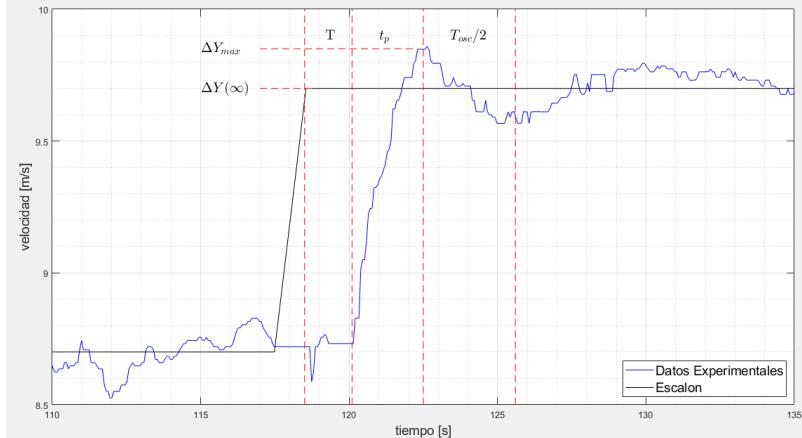


Figura 5.11: Mediciones de velocidad a partir de distintos escalones dados



(a) Parámetros respuesta 2º orden



(b) Estimación de parámetros

Figura 5.12: Estimación de planta

El sistema de "*2º orden con retraso*" posee la función de transferencia observada en la ecuación 7.

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

La ecuación de sobre oscilación (Ecuación 8), es utilizada para calcular el factor de

amortiguamiento (ξ)

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

La ecuación 9 es utilizada para obtener el valor de la frecuencia natural (ω_n) a partir del tiempo de pico.

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

Con ayuda de un código generado en Matlab y ajustes manuales se llegó a la siguiente función de transferencia de segundo orden:

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

Esta función de transferencia se realizó para una entrada entre 0 y 1023, los cuales son el límite mínimo y máximo para determinar el ancho de pulso de la señal PWM como se ve en la sección 5.5.

Para corroborar la elección de la planta se realizó en *Simulink* la respuesta del sistema a los mismos escalones experimentales. En la figura 5.13 y 5.14, se dispuso la respuesta experimental y la simulada para realizar la comparación.

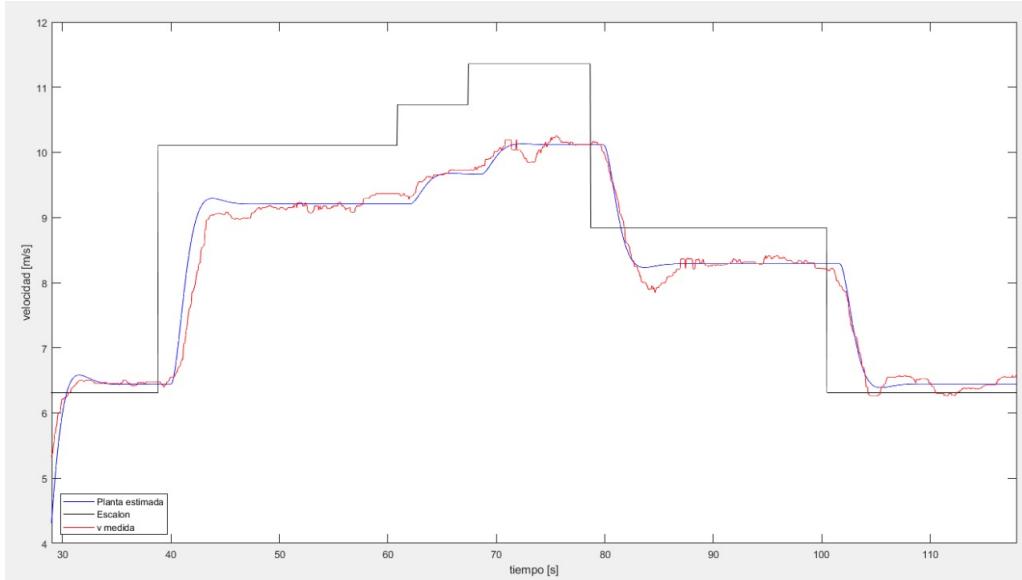


Figura 5.13: Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 1

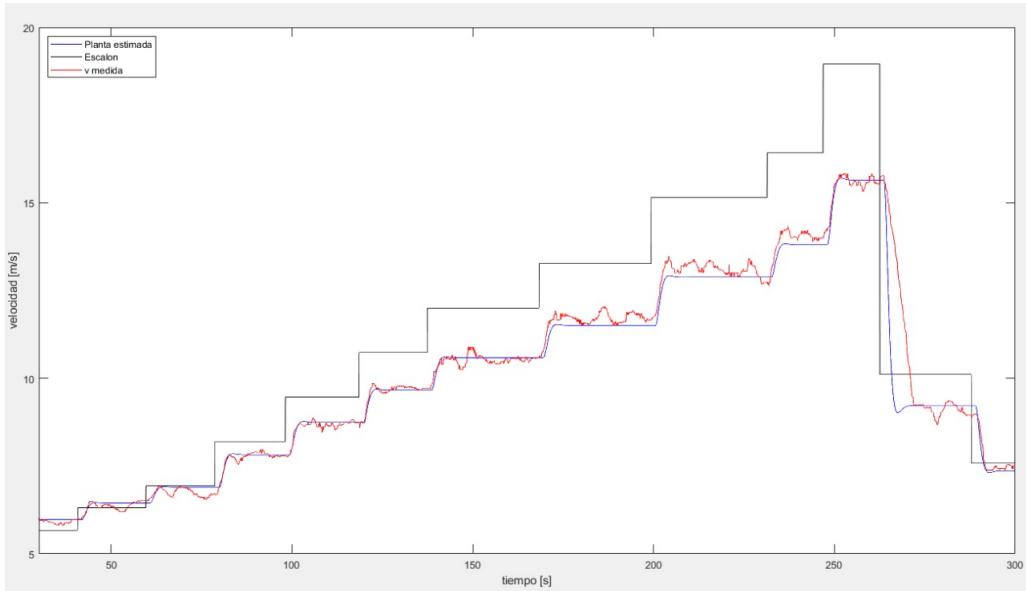


Figura 5.14: Corroboration de estimación de la planta. Ejemplo 2

5.7. Control

Para el cálculo en primera instancia del controlador PID, se utilizó la herramienta de *Matlab*, y a partir de los primeros valores se realizaron pequeñas modificaciones, todas con el formato PI (proporcional - integrador) hasta obtener varios tipos de respuesta. Con los distintos valores de PI (Tabla 5.2) se realizaron pruebas en el Túnel del viento con escalones en la velocidad de referencia de 6 - 7,5 - 8,5 - 7,5 - 7 - 6 m/s, un total de 5 ensayos para los mismos estímulos de entrada. En la figura 5.15 se observa el lazo de control que se utilizó.

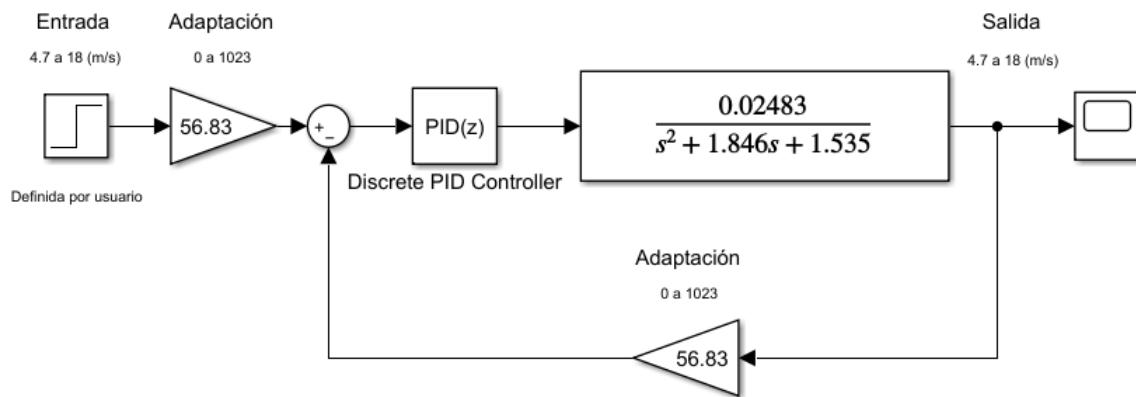


Figura 5.15: Lazo de control

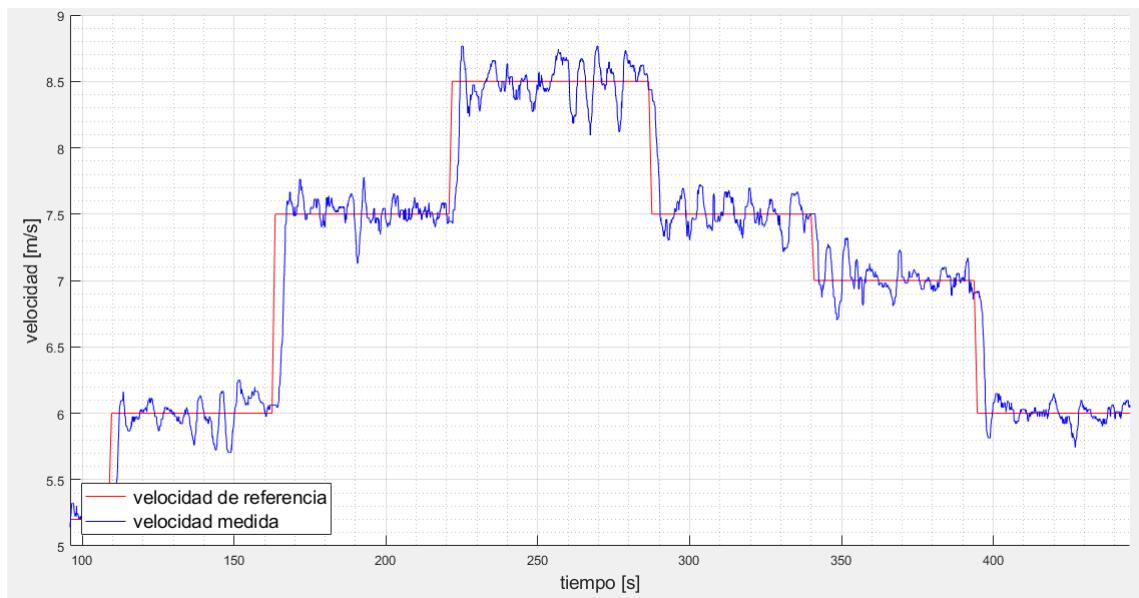


Figura 5.16: Ejemplo de prueba realizada

Los valores de cada configuración PI se muestran en la tabla siguiente

	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

Al visualizar las respuestas obtenidas por las diferentes configuraciones se puede realizar la comparación para un escalón en donde la velocidad sube (figura 5.17) y otro donde la velocidad baja (figura 5.18).

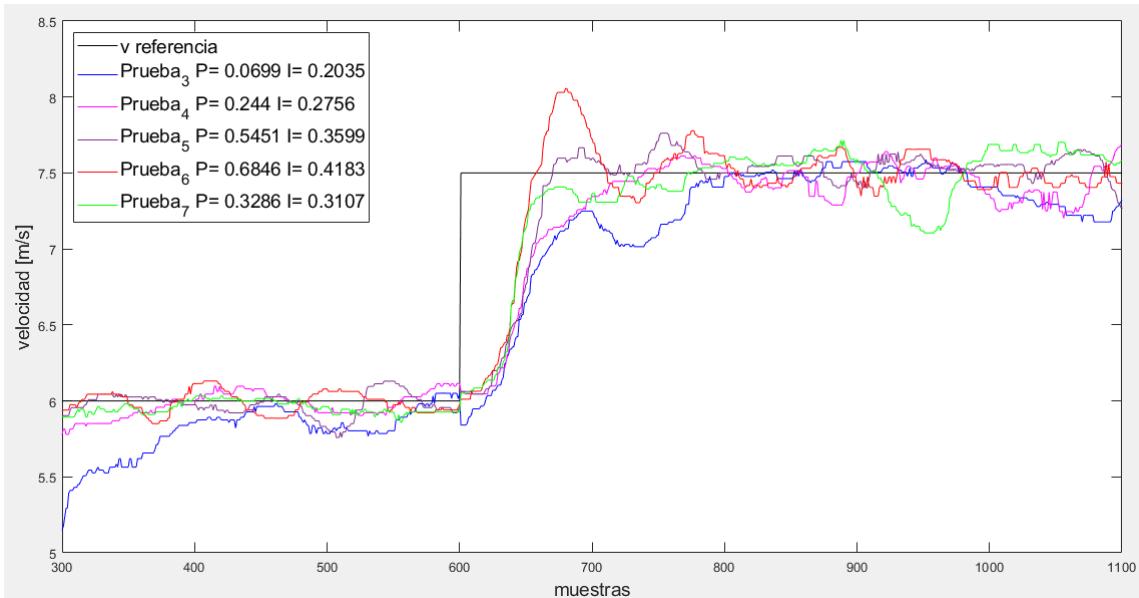


Figura 5.17: Comparación de PI, escalon de subida

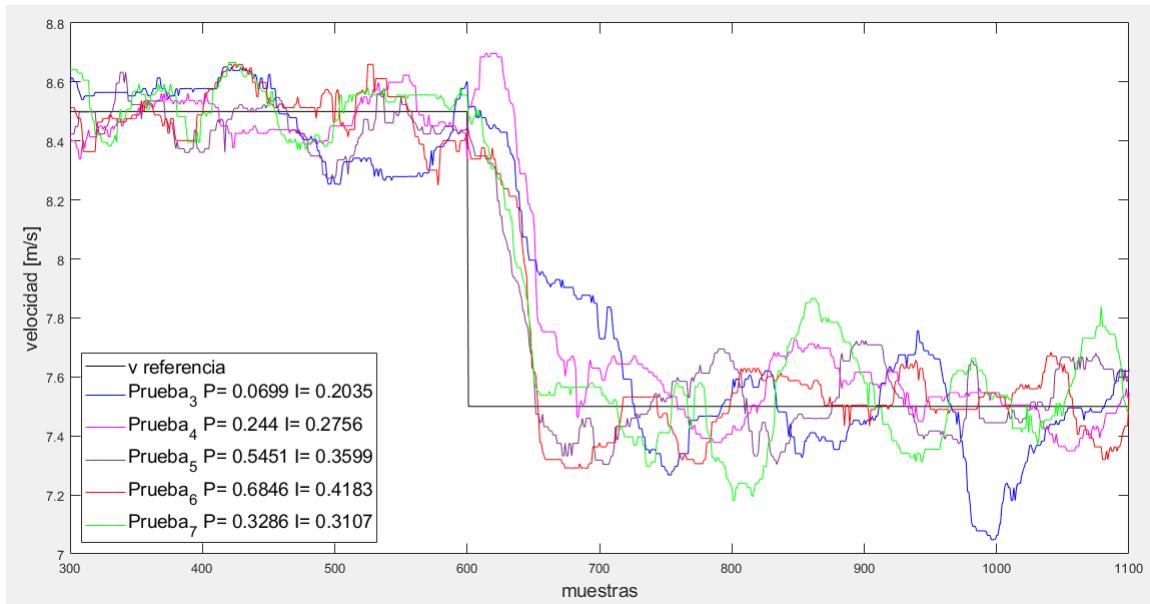


Figura 5.18: Comparación de PI, escalon de bajada

En la figura 5.19 se pueden observar el sistema que genera mayor sobrepico, un sistema con una respuesta mas lenta, y un sistema con respuesta intermedia.

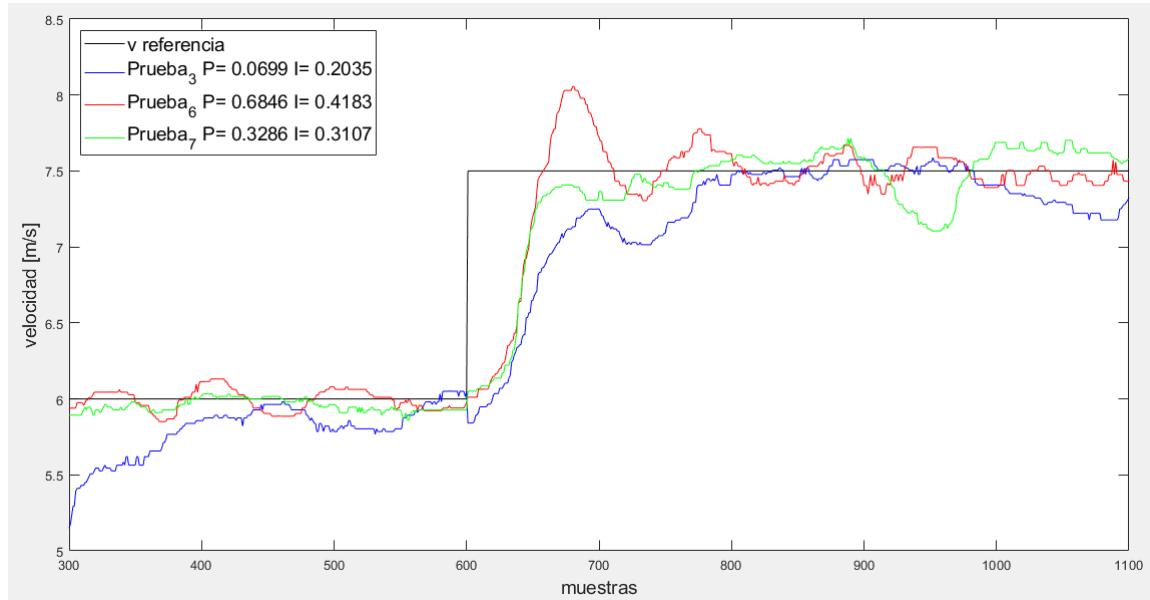


Figura 5.19: Comparación 3 sistemas PI

Al analizar los ensayos y obtener respuestas del sistema parecidas (Figura 5.20 y 5.21) a las generadas en simulación, se determinó que la estimación de la planta se realizó de manera correcta, esto añadió mayor validez al sistema de simulación empleado en todas las pruebas.

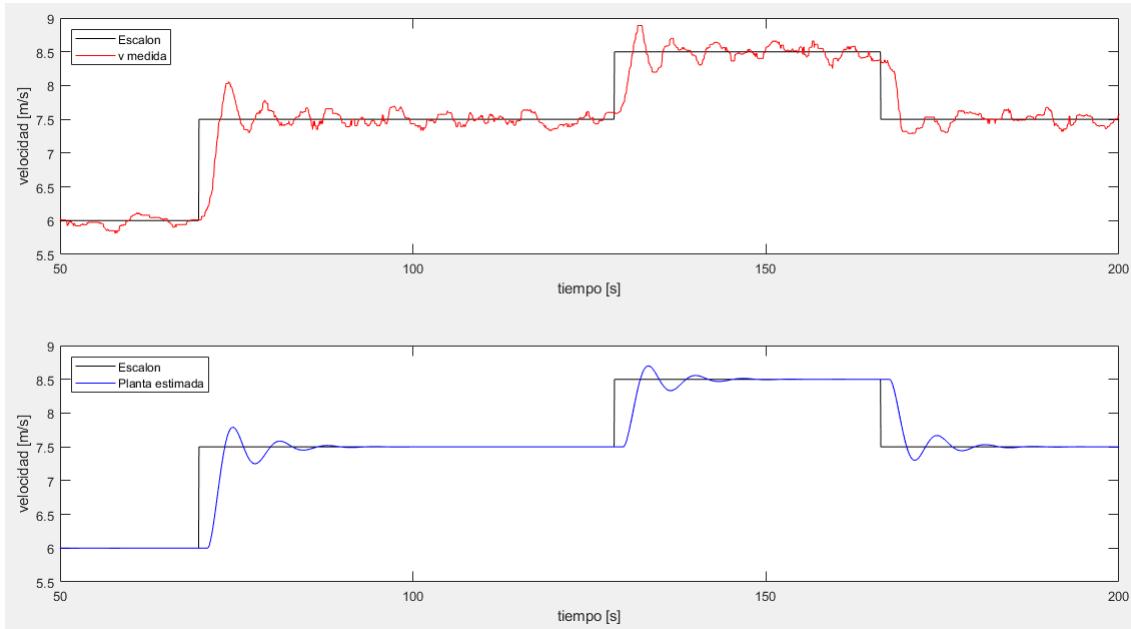


Figura 5.20: Datos Experimentales y Simulados para la *Prueba 6*

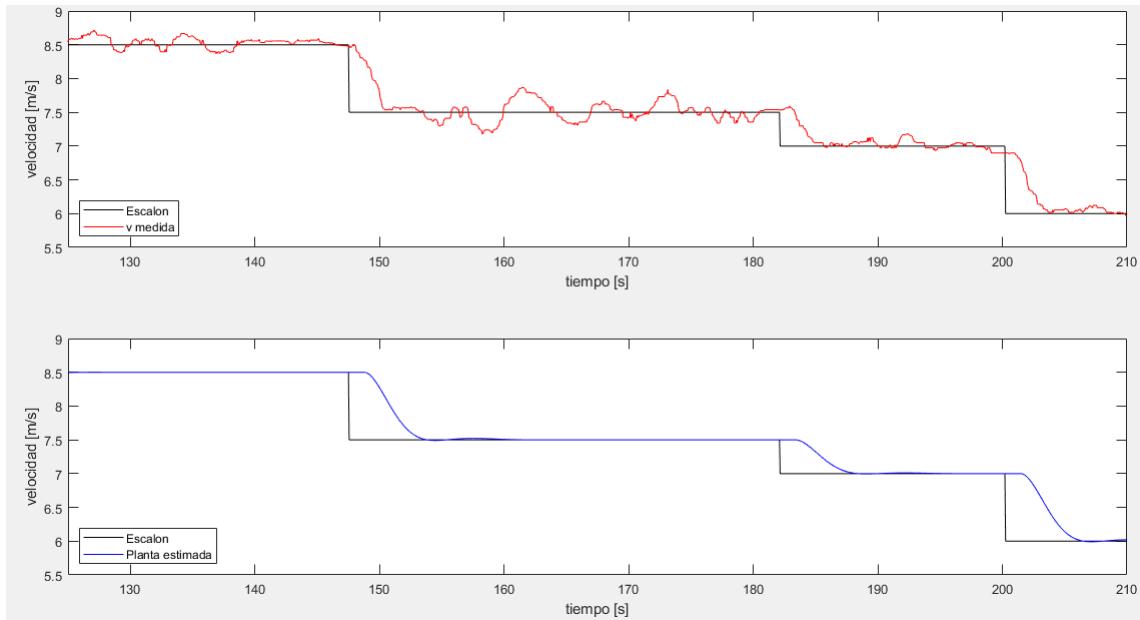


Figura 5.21: Datos Experimentales y Simulados para la *Prueba 7*

5.7.1. Implementación en μ C

Para poder implementar en nuestro μ C el PID, se partió de la estructura interna o fórmula del controlador general discreto en el dominio Z (Ecuación 11) y se trabajó algebraicamente hasta llegar a una forma en donde aplicar la *Transformada Inversa Z* sea más simple. Se utiliza esta herramienta matemática para llevar la ecuación del $PID(z)$ al dominio de tiempo discreto.

$$PID(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = P + I.T_s \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{1}{T_s} \cdot \frac{z-1}{z} \quad (11)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = P \cdot \frac{z^{-1}}{z^{-1}} + I.T_s \cdot \frac{1}{z-1} \cdot \frac{z^{-1}}{z^{-1}} + D \cdot \frac{1}{T_s} \cdot \frac{z-1}{z} \cdot \frac{z^{-1}}{z^{-1}} \quad (12)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = P + I.T_s \cdot \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} + D \cdot \frac{1}{T_s} \cdot (1-z^{-1}) \quad (13)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1}{1-z^{-1}} \left[P \cdot (1-z^{-1}) + I.T_s \cdot z^{-1} + D \cdot \frac{1}{T_s} \cdot (1-z^{-1})^2 \right] \quad (14)$$

$$U(z) \cdot (1-z^{-1}) = E(z) \left[P + \frac{D}{T_s} + \left(I.T_s - P - 2 \cdot \frac{D}{T_s} \right) \cdot z^{-1} + \frac{D}{T_s} \cdot z^{-2} \right] \quad (15)$$

Y si aplicamos la transformada inversa Z a la ecuación 15:

$$u(k) = u(k-1) + \left(P + \frac{D}{T_s} \right) \cdot e(k) + \left(I.T_s - P - 2 \cdot \frac{D}{T_s} \right) \cdot e(k-1) + \frac{D}{T_s} \cdot e(k-2) \quad (16)$$

De esta forma obtenemos la ecuación del PID en función de la muestra actual y anteriores, que nos sirve para implementar de manera directa en el μ C.

5.7.2. Pruebas de control

Para observar la respuesta del control se generó perturbaciones con las compuertas laterales del túnel (Figura 5.22), antes utilizadas para realizar variaciones de velocidad [2] cuando el laboratorio no poseía un control continuo de ella porque se utilizaba un reóstato (8 posiciones) para modificar la resistencia rotórica del motor (Figura 5.23).



Figura 5.22: Compuertas utilizadas como perturbaciones



Figura 5.23: Fotos del reóstato (izquierda) y del banco de resistencias (derecha)

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 5.22. Esta entrada de aire producía variaciones en la velocidad que el control implementado corregía según el PID utilizado. Se realizó pruebas donde se abrió y cerró las compuertas para observar estos cambios y el correcto control de velocidad (Figura 5.24 y 5.25).

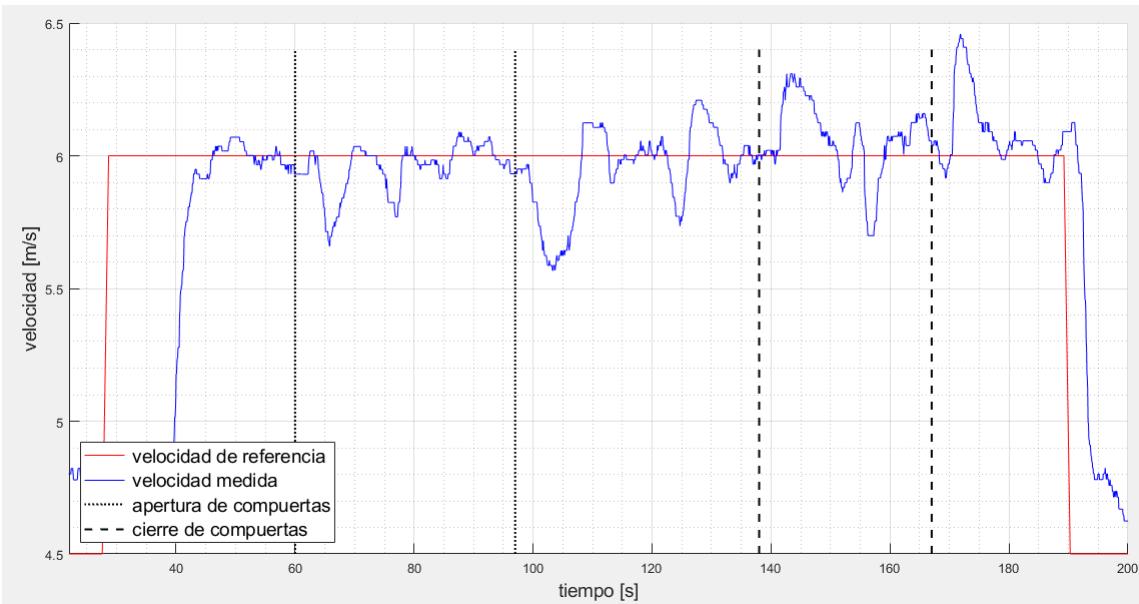


Figura 5.24: Comportamiento del sistema ante perturbaciones. Ejemplo 1.

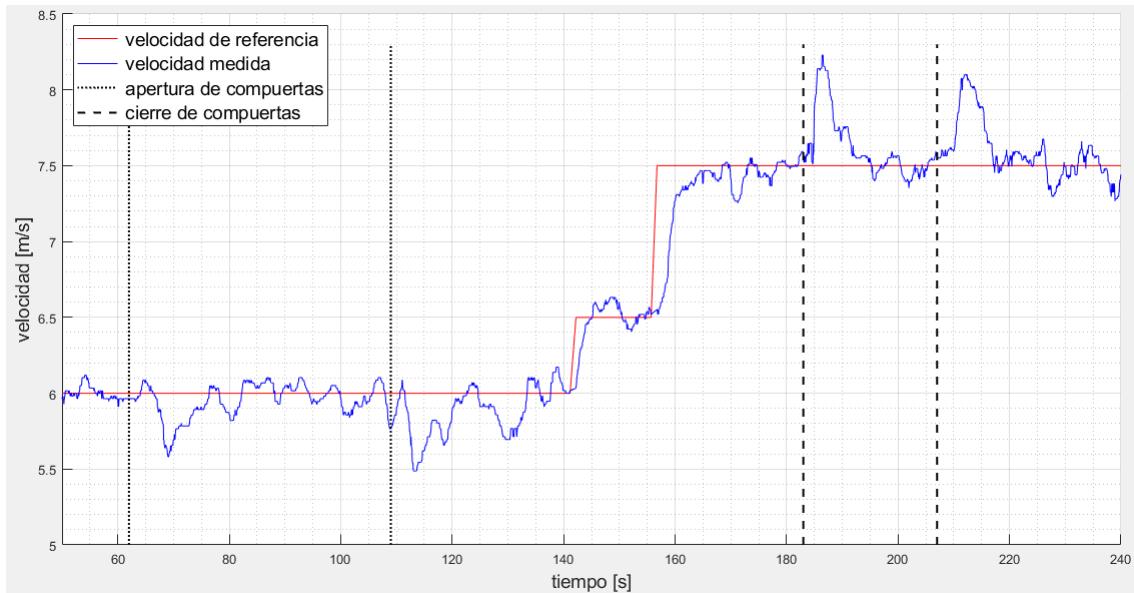


Figura 5.25: Comportamiento del sistema ante perturbaciones. Ejemplo 2.

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 produzcan errores como solía suceder mientras estaban en la protoboard (Figura 6.1).

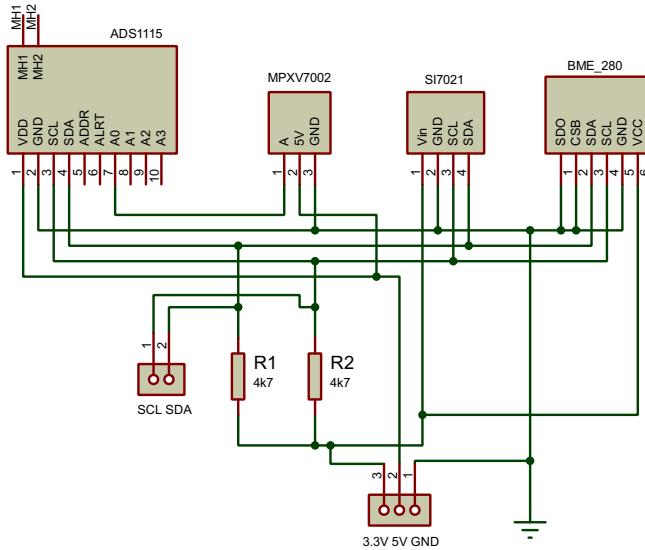


Figura 6.1: Esquema de placa con sensores utilizados

A raíz de varias mediciones, durante distintos días, y al realizar el contraste con el instrumento **TESTO 435** se decidió retirar de la caja a los sensores de temperatura y humedad para que luego el cálculo de la velocidad del aire no esté afectado por posibles cambios de estos, 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 1. Estos datos están expresados en la tabla 6.1.

Referencias de la tabla:

- **I:** Instrumentos- Datos obtenidos con los instrumentos del Laboratorio de fluidos.

Fecha	Obs.	T [°C]		H [%]		P [Pa]		Dens. calculada [kg/m³]		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

- **S:** Sensores- Datos obtenidos a partir de la medición con los sensores utilizados en el proyecto.
- **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 de la placa reguladora.

Al tomar como valor verdadero los valores de THP medidos con los instrumentos calibrados, se puede observar que el error relativo del cálculo de densidad es menor al 1%.

6.2. Fluctuaciones de velocidad

A partir de la teoría que se observó en la sección 4.2.2 figura 4.4, se decidió corroborar esta propiedad. Con los datos medidos y a través de un código generado en Matlab y se constató que el promedio de las fluctuaciones tiende a cero (Figura 6.2).

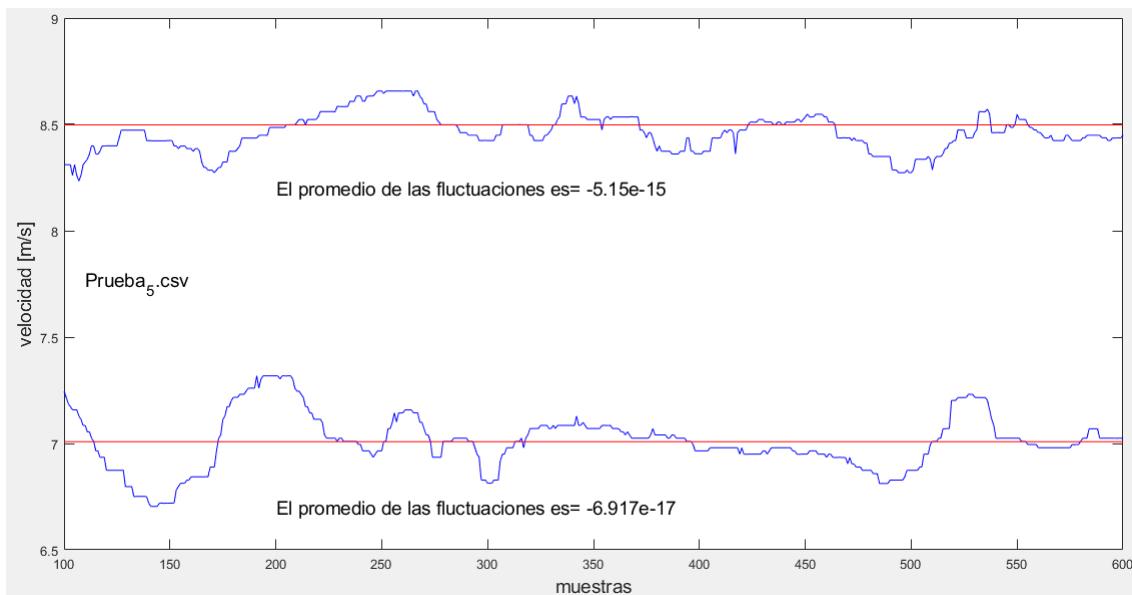


Figura 6.2: Fluctuaciones en velocidades medidas

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*, al mantener la presión atmosférica constante. (Los valores con fondo gris corresponden a la diferencia de densidades).

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

		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

		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. Contrastación de diferencia de presión

El sensor *MPX7002* tiene como salida una tensión proporcional a la diferencia de presión medida, por lo que fue necesario utilizar un *ADS1115* para transformar estos valores, a través de una constante, en unidades de presión (Sección 5.1).

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 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, luego se generó un gráfico de puntos con las muestras tomadas y se observó que el error es mayor para diferencias de presión mayores a 100 Pa (Figura 6.3).

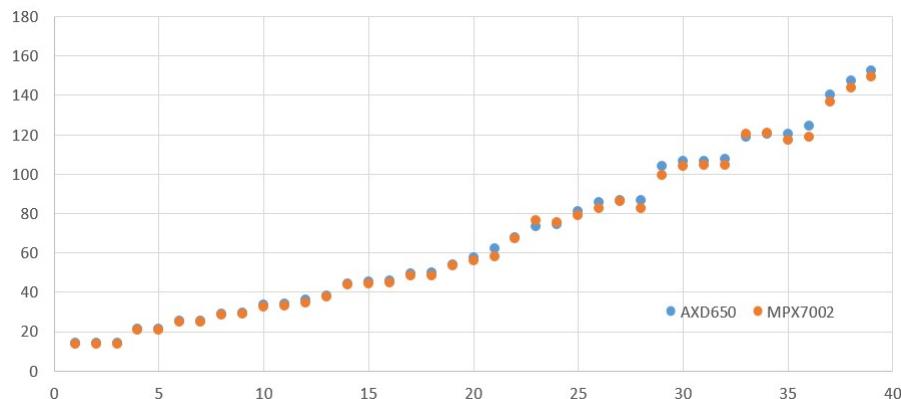


Figura 6.3: Contrastación de diferencia de presión

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

7. Implementación

Luego de realizar las pruebas y observar los cambios necesarios para un buen uso en el laboratorio, se procedió a realizar la implementación final (Figura 7.1). Dicha implementación se dividió en dos bloques, uno perteneciente a la Aplicación (Sección 7.1), programación de la parte gráfica y adquisición de datos, y otro bloque de Hardware (Sección 7.2), parte física del proyecto.

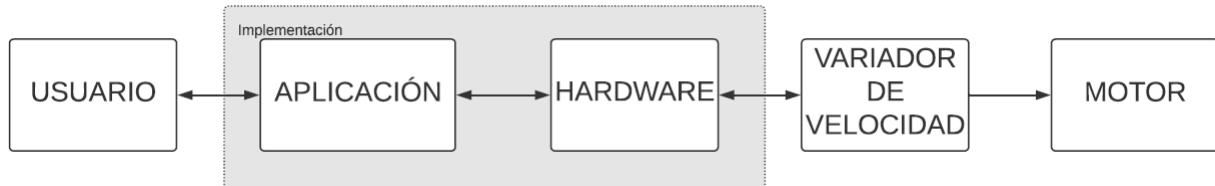


Figura 7.1: Bloques implementados

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 (Figura 7.3), donde se utilizó el programa de código abierto *Processing* en conjunto con la biblioteca *ControlP5* [9]. 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:

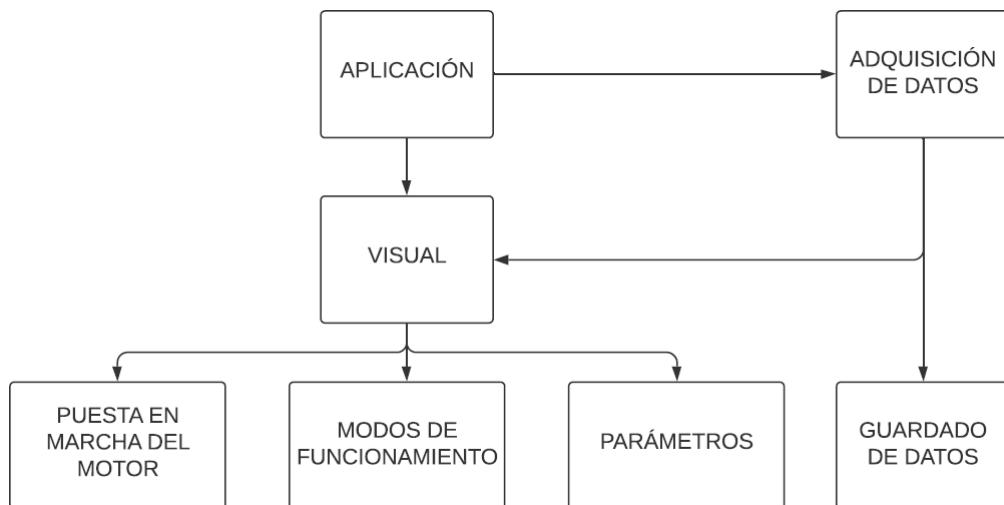


Figura 7.2: Bloque *Aplicación*

1. Bloque “Adquisición de datos”:

Obtiene datos provenientes del microcontrolador (Tabla 7.1) que se guardan en un archivo “.csv”.

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}	,
-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	-------	---	----------	---	----------	---	----------	---	----------	---

Tabla 7.1: Datos adquiridos desde el μC

Referencia de cada dato:

- D_0 : velocidad del aire estimada.
- D_1 : valor de frecuencia o velocidad preestablecida.
- 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 de que el lazo de control está cerrado.
- 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 THP, velocidad, v/f de referencia y realiza gráficos en tiempo real donde el usuario decide la visibilidad de distintos parámetros y su correspondiente escala.
- Sub-bloque **Puesta en marcha del motor**: En el sub-bloque 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 μC :
 - **Modo Lectura de datos**: al realizar la conexión del puerto serial, el μC comienza a adquirir datos y muestra valores de THP, velocidad y frecuencia de referencia por defecto. El modo solo recibe datos del microcontrolador pero esta configuración espera comandos de *autofunción* o *Modo Ai1* para enviar al μC una nueva orden.
 - **Modo Autofunción**: El modo cierra el lazo de control, lee un archivo .csv dónde se encuentran los escalones de velocidad y el tiempo de duración de estos. Envía al μC los datos del archivo elegido, y este manda el comando para que se implementen los escalones preestablecidos.
 - **Modo Ai1**: Este modo envía y recibe información del μC 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 cierra el lazo de control y 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 μ C es un vector, separados por comas, en formato “string” como se observan en la tabla 7.2, y la referencia de cada elemento son las siguientes:

$$D_0 , | D_1 , | D_2 , | D_3 , | D_4 , | D_5 , | D_6 , | D_7 ,$$

Tabla 7.2: Datos enviados al μ C

- 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 con longitud enviado por el valor D_6 .



Figura 7.3: Aplicación creada

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 (Figura 7.4) con los bloques utilizados en la sección 5. Esta nueva placa fue realizada por la máquina de prototipado **LPKF Protomat S63** perteneciente al Departamento de Electrónica de la Universidad. Una vez que se obtuvo la plaqueta se soldó los componentes.

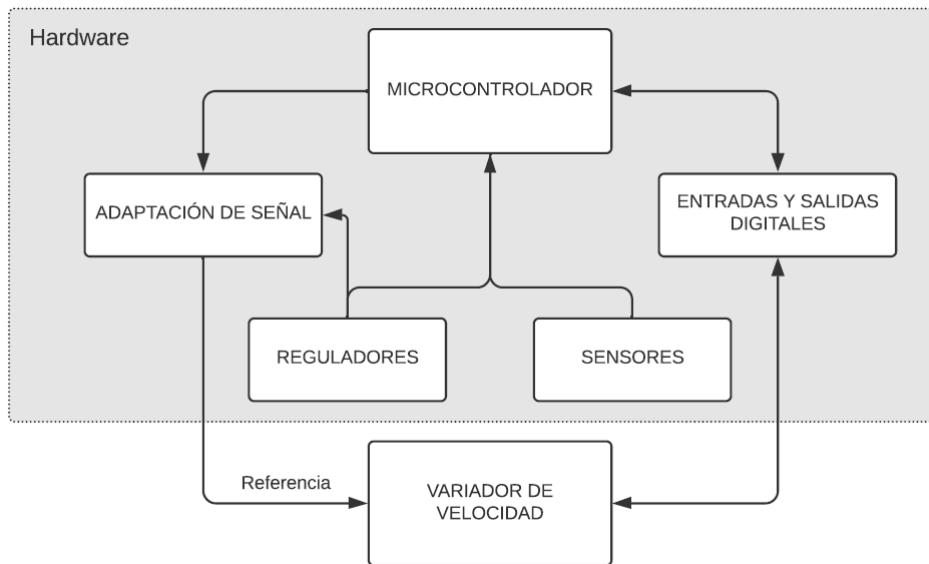


Figura 7.4: Bloque *Hardware*

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

7.3. Costos

El proyecto se comenzó a mediados del año 2019, por lo que los sensores de temperatura, humedad, presión atmosférica y diferencia de presión fueron comprados en esa fecha en el exterior y los demás componentes, en la actualidad, en la ciudad adaptándonos al stock encontrado. En la tabla 7.3 se observan los valores totales para realizar la implementación final del *hardware* con precios actualizados al mes de agosto de 2021. *Precios obtenidos de Mercado Libre.

Automatización de Túnel de Viento

<i>Unidad(es)</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio (\$)</i>	<i>Sub-Total (\$)</i>
1	BME280*	3850	3850
1	MPXV7002dp*	8489	8490
1	SI7021*	3769	3770
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
1	Pines machos	245	245
1	Pines hembra	245	245
1	Arduino NANO	900	900
	Caja contenedora		
Total=			\$ 22025

Tabla 7.3: Gastos de implementación

8. Recomendaciones futuras

- Utilización de un cable UTP mallado para mejorar interferencias que puedan producirse entre el variador y el μ C.
- Realización de una aplicación bluetooth para Android.
- Automatización de las perturbaciones que se pueden realizar sobre el túnel de viento.
- 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

Siempre que se habla de control de procesos industriales, los PLC son los dispositivos más adecuados para el desarrollo de sistemas de este tipo. Para nosotros fue un desafío utilizar un microcontrolador para llevar a cabo el control de velocidad del túnel de nuestra Universidad.

Al utilizar un μ C no se tiene la robustez que un dispositivo industrial posee, pero sin embargo, logramos una comunicación estable y un control eficaz sobre el variador de velocidad. Además, al disponer de esta opción, los costos de diseño e implementación son más económicos contra el empleo de dispositivos industriales.

Por más que teníamos noción sobre las herramientas de programación, el proyecto de automatización del túnel fue un nuevo aprendizaje que sumó a nuestros conocimientos nuevos lenguajes de programación, técnicas de trabajo y adicionalmente, saberes sobre el funcionamiento de los dispositivos que realizan las acciones sobre el proceso: motores, variadores de velocidad, señales analógicas y digitales, etc.

Al realizar una aplicación para visualizar datos relevantes y un gráfico en tiempo real, esta interfaz nos permite realizar la adquisición de datos para guardarlos en tablas y ser trabajados en un posterior análisis. La misma permitió tener un manejo remoto del variador de velocidad.

Como resultado final, se obtuvo un control de velocidad, en donde las mediciones obtenidas fueron cercanas a los valores estimados por el Laboratorio Mecánica de Fluidos, lo que ayudaría a minimizar la cantidad de procesos para la determinación de velocidad durante la contrastación de anemómetros. Además, nuestro controlador permitiría realizar nuevas experiencias de laboratorios por materias afines a la materia, ya que se podrían generar cambios de velocidad controlados, tipo ráfagas.

10. Bibliografía

Referencias

- [1] Página del Laboratorio de Mecánica de Fluidos - UNPSJB. URL: <http://www.ing.unp.edu.ar/mecanica/Paginas/Tunel.htm>.
- [2] 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).
- [3] Long Shenq. *Manual de instalación y programación : Variador de velocidad LS650 para motor de C.A.*
- [4] INTI. “Cálculo de la densidad del aire húmedo”. En: *Procedimientos del INTI* (2015).
- [5] Yunus A Cengel. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. (2006).
- [6] 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).
- [7] Processing. URL: <https://processing.org>.
- [8] Jorge Pomares y Ángel Martínez Bueno. “Sistemas de Control Automático. Identificación experimental de sistemas”. En: *Sistemas de Control Automático* (2011).
- [9] Andreas Schlegel. *Biblioteca ControlP5*. URL: <http://www.sojamo.de/libraries/controlP5/>.

Anexos

A. Descargas

El siguiente proyecto con sus respectivos archivos se encuentra para realizar la descarga en el repositorio GITHUB. poner la tarjeta como imagen https://opengraph.githubassets.com/1/UNPSJB-YC/Automatizacion_Tunel_UNPSJB

https://github.com/UNPSJB-YC/Automatizacion_Tunel_UNPSJB

B. Manual de usuario de la aplicación

B.1. Requerimientos del sistema

- Windows
- Driver de comunicación serial para CH340 <https://electrocrea.com/blogs/tutoriales/como-instalar-driver-ch340-para-arduisos-genericos>

B.2. Puesta en marcha

1. Alimente variador de velocidad y el motor.
2. Enchufe a 220V el cable de alimentación que sale de la caja de control.
3. Conecte el cable USB.
4. Ejecute el programa “NOMBRE.EXE”
5. Seleccione el puerto dónde se encuentra conectado el microcontrolador.
6. Active el puerto.
7. Al inicializar el puerto, el microcontrolador comienza a entregar valores a la aplicación por lo que se observa THP, velocidad estimada y frecuencia de referencia.



Figura B.1: Puerto activado. Visualización de los valores del μ C.

B.3. Gráfico en tiempo real

B.3.1. Visibilidad de las señales en tiempo real

En la parte izquierda inferior del programa, se puede activar o desactivar la visibilidad de las variables a observar, solo basta realizar un click en los rectángulos, y estos al estar activados se colocarán del color correspondiente a la señal.

B.3.2. Escala

En la parte inferior se encontrará “Escala” donde se establece la escala correspondiente de cada señal.

1. Realice click en el interior del rectángulo
2. Borre el número que posee y coloque el valor nuevo a ingresar.
3. Presione “enter”.
4. La escala de la señal elegida será modificada.

Ejemplo de escala:

Si se coloca en una señal “escala: 10”, la variable observada en tiempo real estará aumentada 10 veces.

B.3.3. Límite del eje vertical

El eje vertical del gráfico en tiempo real puede ser modificado según necesidad.

1. Realice click en el interior del rectángulo.
2. Borre el número que posee y coloque el valor nuevo a ingresar.
3. Presione “enter”.
4. El eje “vertical” se verá modificado.



Figura B.2: Gráfico en tiempo real

B.4. AutoFucion

El modo de auto-función carga un archivo “.csv” que se encuentra dentro de la carpeta “autofun”. El archivo “.csv” posee los datos pertenecientes a los escalones de velocidad deseados y el tiempo de ejecución de cada uno.

El archivo tiene que tener el formato observado en la Tabla B.1, donde se ve que posee un encabezado. Si se desea que la velocidad sea un número decimal, este debe ir con punto.

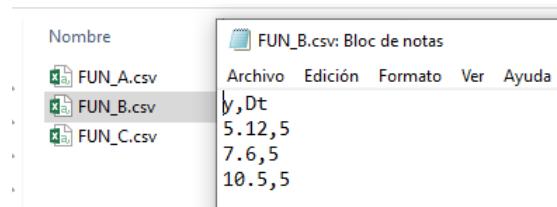


Figura B.3: Archivos dentro de la carpeta "autofun"

y,Dt
y1,Dt1
y2,Dt2
y3,Dt3

Tabla B.1: Formato .csv

Mientras que se ejecute esta función aparecerá una señal visual debajo del botón abrir. (Figura B.4)



Figura B.4: Aplicación en modo Autofunción

B.5. Ai1

B.5.1. Control desactivado

Al utilizar este modo de funcionamiento, se puede ingresar un valor aproximado de frecuencia. El lazo de control estará abierto.

B.5.2. Control activado

El lazo de control estará activado, ante perturbaciones el sistema tiende a establecerse a la velocidad estipulada. Para determinar la velocidad de referencia se debe presionar

sobre la caja de “velocidad”, ingresar un valor y presionar sobre el botón “enviar”.

B.6. Encendido/ apagado del motor

El encendido/ apagado del motor se puede realizar de dos formas:

B.6.1. Panel frontal

Si el parámetro F7 del variado de velocidad se encuentra en “0”, la marcha y parada del motor será realizada por los botones físicos en el panel frontal del variador.

B.6.2. Aplicación

Si el parámetro F7 del variador se encuentra en “1”, la marcha y parada del motor será realizada por los botones propios de la aplicación.

B.7. Guardado de datos

Al colocar un nombre y presionar el botón guardar, se generará un archivo “.csv” con los datos que el microcontrolador capturó cada aproximadamente 55ms. Estos archivos se guardarán en la carpeta "data1" dentro de la carpeta general de la aplicación.

Alerta: Una vez que se presiona el botón guardar o el puerto se cierra los datos son borrados y se comenzará una nueva tabla.



Figura B.5: Guardado de datos

B.8. Lectura de datos obtenidos

El encabezado de la tabla (Figura B.6) muestra las siguientes leyendas:

- *Muestra:* número de muestra tomada

- *Tiempo*: tiempo desde el inicio del puerto serie [ms].
- *Temp*: temperatura ambiente [° C].
- *Hum*: humedad relativa del ambiente [%].
- *Pres*: presión atmosférica [hPa].
- *Den*: densidad estimada por el microcontrolador [kg/m^3].
- *DP*: diferencia de presión medida a través del MPX7002 en conjunto con ADS1115 [Pa]
- *Ref*: Valor de frecuencia o velocidad preestablecida [Hz ó m/s].
- *VelFrec*: Velocidad del aire estimada [m/s].
- *PWM*: señal de acción de control.
- *Control*: señal de que el lazo de control está cerrado.
- *Error*: error entre la velocidad estimada y la de referencia.
- *ESTADOvariador*: estado encendido/apagado del motor.
- *ERRORvariador*: indicación de algún error del variador de velocidad.
- *TiempoRel*: indica tiempo desde el ultimo guardado de datos.
- *ControlAutomatico*: indicación de comienzo y fin del control automático.

Para hacer lectura o interpretación de los datos se recomienda utilizar el script de matlab “NOMBRE DEL ARCHIVO DE MATLAB”

Muestra	Tiempo	Temp	Hum	Pres	Den	DP	Ref	VelFrec	PWM	Control	Error	ES
0,563	0,23	0,056	18,349	996,68414	1,1703	0,0	14,0	5,0	0,052	270,0	0,0	0,508,96,0,0,0,0,0,563,0,0,0

Figura B.6: Archivo .csv generado

B.9. Falla externa

Al presionar el botón de “Falla externa” el μ C enviará una señal al variador y el sistema se detendrá.

C. Processing

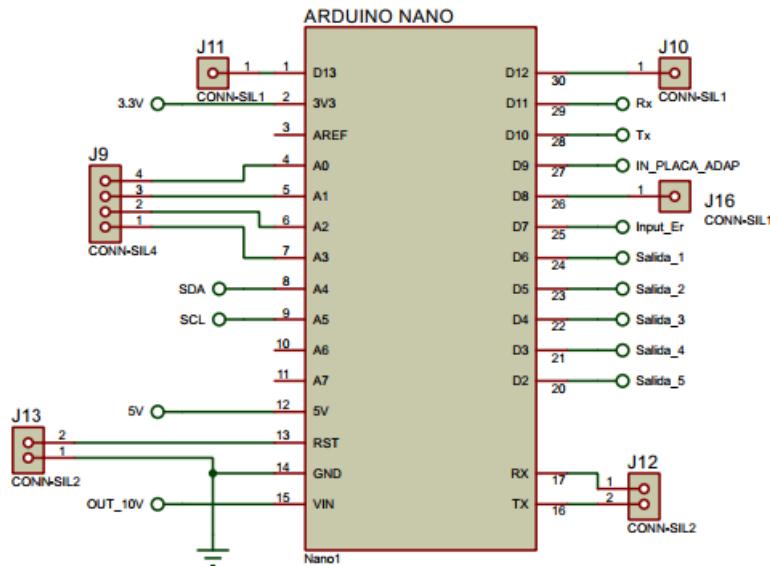


Figura C.1: Esquema del microcontrolador

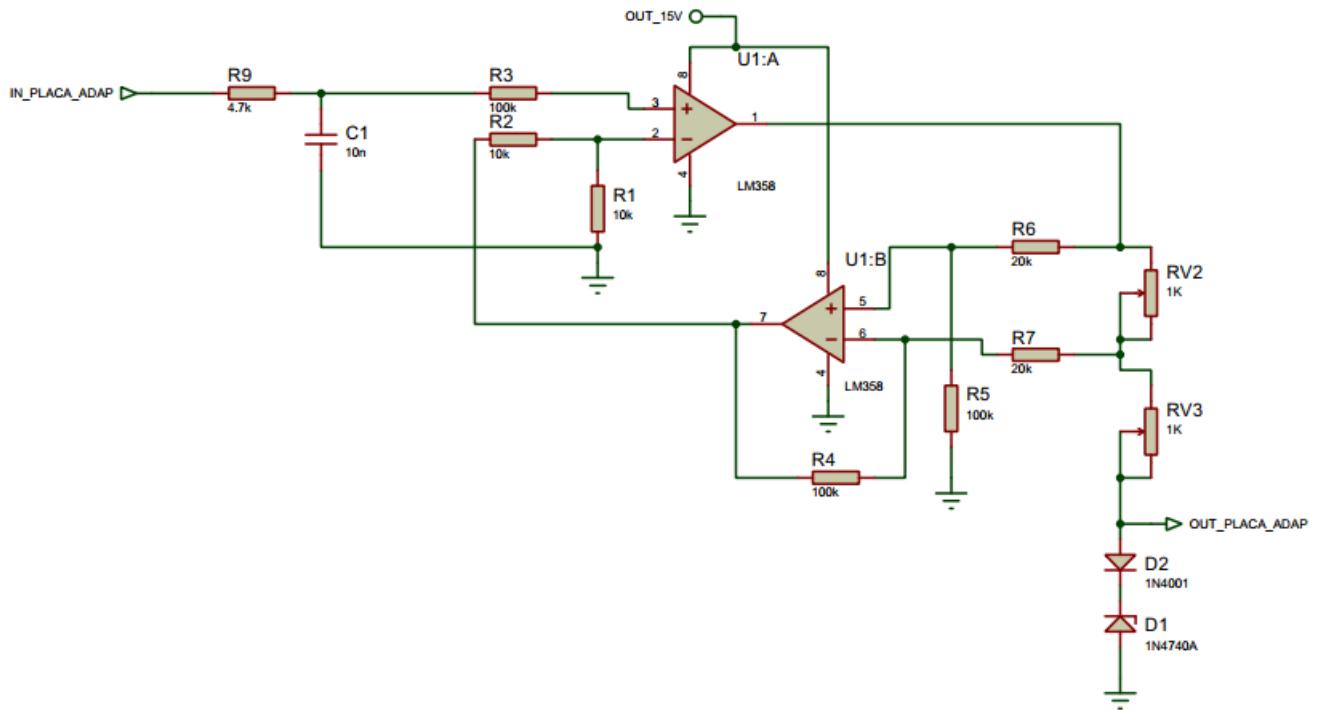


Figura C.2: Esquema de la placa adaptadora

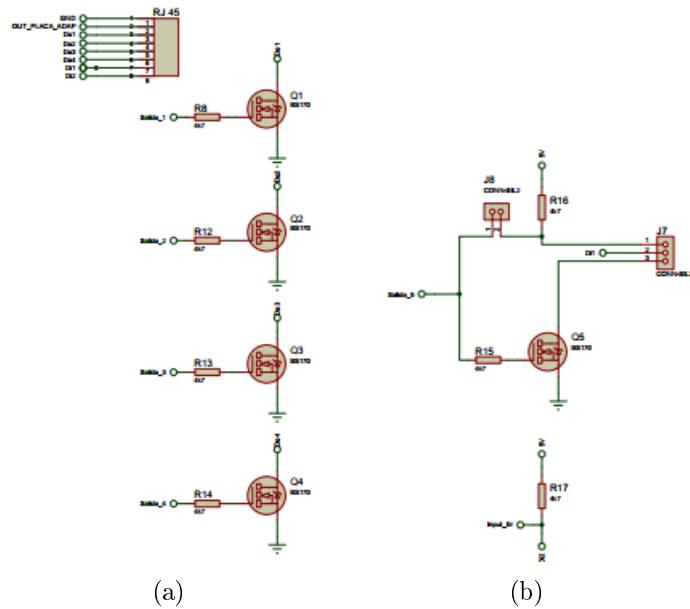


Figura C.3: Esquema de entradas/ salidas

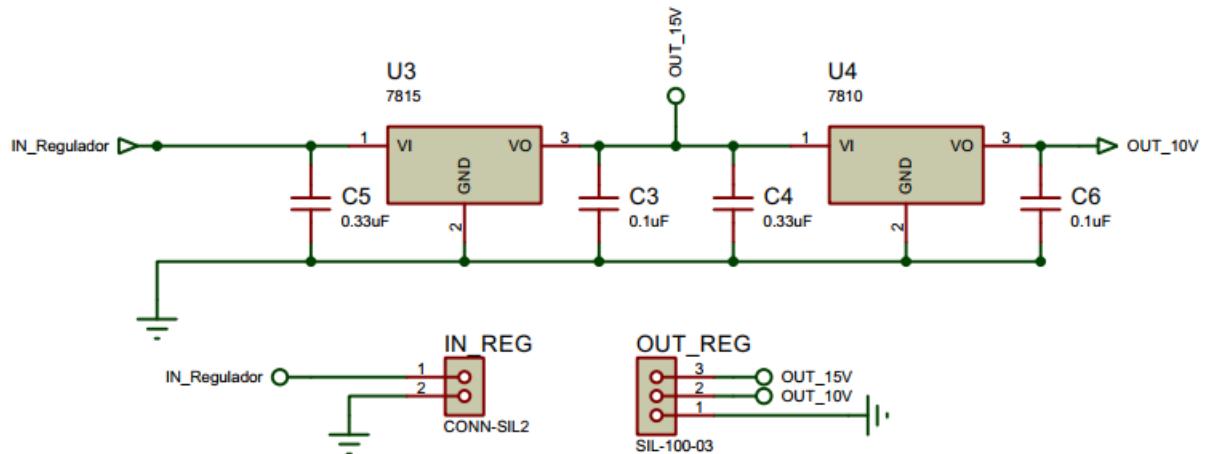


Figura C.4: Esquema de la placa reguladora

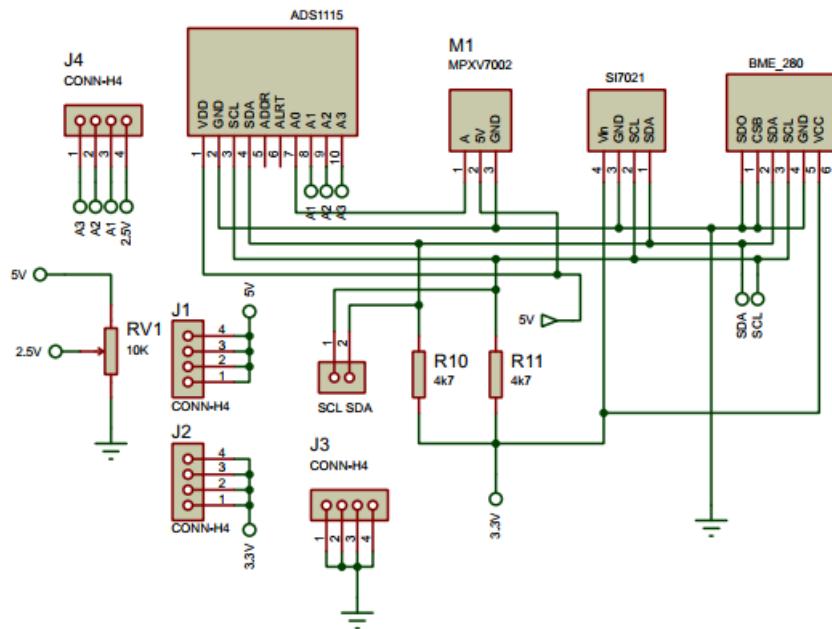


Figura C.5: Esquema de sensores

D. Código Arduino

E. Código Processing

F. Código Matlab

G. Modelo de placa