

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Medición acústica de la velocidad del viento

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

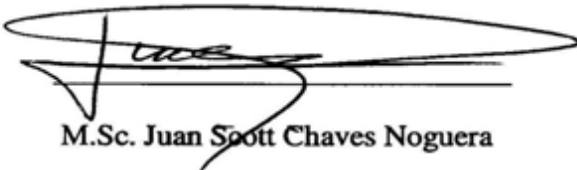
Esteban Padilla Padilla

Cartago, Junio de 2013

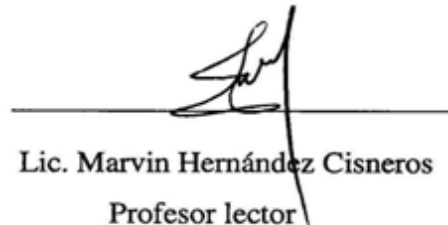
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



M.Sc. Juan Scott Chaves Noguera
Profesor lector



Lic. Marvin Hernández Cisneros
Profesor lector



M.Sc. Néstor Hernández Hostaller
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 24 Junio 2013

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 24-06-2013



Esteban Padilla Padilla
Ced: 304090137

Resumen

La medición de la velocidad y dirección del viento es vital en materia de estimación y control de trayectorias de incendios forestales, sin embargo los mecanismos tradicionales de medición no se ajustan a la realidad de proyectos en los que se requiere de cientos de estos dispositivos, ya sea por su precio en el caso de anemómetros ultrasónicos o térmicos, o por la necesidad de mantenimiento periódico de los anemómetros mecánicos. Es así que surge la iniciativa de encontrar métodos alternativos para medir la velocidad del viento.

En el presente proyecto se describe un conjunto de experimentos, llevados a cabo con el fin de determinar la viabilidad de medir la velocidad del viento a través del ruido que induce el fluido laminar sobre micrófonos capacitivos. Se analiza la distribución de probabilidad de la señal acústica para encontrar factores correlacionados con la velocidad del viento. Cada elemento de la señal que presenta relación con la velocidad del viento es analizado, en razón del error de estimación a través de la comparación con las mediciones llevadas a cabo con un anemómetro de filamento caliente. Se emplea un modelo lineal de media móvil como método de estimación de la velocidad del viento. Se analiza su efectividad en función del error de medición, la respuesta dinámica y la sensibilidad con respecto a la dirección del viento. Por último se registra la correlación cruzada existente entre dos micrófonos sujetos a un flujo turbulento.

Palabras clave: Anemómetro, micrófono capacitivo, ruido inducido del viento túnel de viento, media móvil.

Abstract

The measurement of wind speed and direction is vital in terms of trajectory estimation and control of forest fires. Traditional measurement mechanisms do not conform the reality of projects that require hundreds of these devices, and either by its price in the case of ultrasonic and thermal anemometers, or the need for regular maintenance of mechanical anemometers. Thus, the need arises to find alternative methods to measure wind speed.

This document describes a set of experiments developed to determine the feasibility of measuring the wind speed through the induced noise on capacitive microphones by laminar fluids. The probability distribution of the acoustic signal was analyzed in order to find factors correlated with wind speed. Each element of the signal, which has relation with the wind speed, was analyzed on base of the estimation error and compared to the measurements performed with a hot wire anemometer. The Moving Average model was used as the method to estimate the wind speed. The effectiveness is analyzed in terms of the measured error, dynamic response, and sensitivity to the wind direction. Finally, the existing cross correlation between two microphones that are subject to a turbulent flow was recorded.

Keywords: Anemometer, capacitive microphone, wind induced noise, wind tunnel, moving average.

a Dios y a mis padres

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vi
Lista de símbolos y abreviaciones	vii
Introducción	1
1.1 Meta y Objetivos del proyecto	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
Marco Teórico	4
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 Flujo laminar y turbulento.....	5
2.2.1 Teoría del flujo de fase única.....	5
2.2.2 El límite de numero Mach.....	6
2.2.3 El numero de Reynolds	7
2.3 Túneles de viento de baja velocidad.....	7
2.3.1 Principales componentes de un túnel de viento.....	8
2.4 Termo Anemómetro.....	9
2.4.1 Filamento caliente.....	9
2.4.2 Termistores.....	12
2.5 Micrófono capacitivo	13
2.5.1 Ruido del viento inducido sobre micrófonos	14
Mediciones acústicas	17
3.1 Implementación túnel de viento	17
3.1.1 Dimensionamiento de secciones túnel viento.....	17
3.1.2 Circuito control de velocidad del ventilador centrífugo.....	24
3.1.3 Implementación del túnel de viento	27
3.2 Medición de filamento caliente.....	29
3.2.1 Circuito corriente constante.....	29
3.2.2 Circuitos acondicionadores de señal	30
3.2.3 Digitalización y procesamiento.....	32
3.3 Medición acústica.....	37
3.3.1 Algoritmo función de masa de probabilidad.....	37
3.3.2 Algoritmo espectro frecuencia.....	38
3.3.3 Algoritmos media móvil.....	39

3.3.4 Algoritmos correlación cruzada	39
Resultados v análisis	42
4.1 Distribución de probabilidad	42
4.2 Espectro en frecuencia	47
4.3 Presión sobre la membrana	49
4.4 Media móvil	50
4.5 Directividad	53
4.7 Correlación cruzada.....	55
Conclusiones v recomendaciones	57
Bibliografía.....	59
Apéndices	61
A Media móvil.....	61
B Algoritmos.....	61

Índice figuras

Figura 2.1. Cinemática de flujo laminar y turbulento	5
Figura 2.2. Componentes de un túnel de viento.....	8
Figura 2.3. Resistencia en función de la temperatura	12
Figura 2.4. Esquemización de un micrófono capacitivo	14
Figura 2.5. Estructura del modelo de media móvil	15
Figura 3.1. Esquemas de los instrumentos de medición ubicados en la sección de prueba (a) Micrófono capacitivo (b) Punta de filamento caliente.....	17
Figura 3.2. Sección de pruebas del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros.....	18
Figura 3.3. Difusor del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros	19
Figura 3.4. Curvatura resultante para las paredes del compresor.....	20
Figura 3.5. Compresor del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros	21
Figura 3.6. Ventilador centrífugo impulsado por motor de inducción, con sus respectivas dimensiones en centímetros.....	21
Figura 3.7. Túnel de viento de baja velocidad para mediciones de ruido Inducido sobre micrófonos.....	22
Figura 3.8. Graficas de variables físicas en el túnel de viento a medida que aumenta la velocidad del aire que ingresa a la contracción.....	23
Figura 3.9. Distribución de velocidades en el túnel de viento	23
Figura 3.10. Sección transversal del túnel de viento tanto para distribución de velocidades como para distribución de presión	24
Figura 3.11. Diagrama de bloques circuito controlador de velocidad.....	25
Figura 3.12. Formas de onda para la tensión resultante suministrada al motor	26
Figura 3.13. Circuito control de ancho de pulso para variador de velocidad.....	26
Figura 3.14. Implementación túnel de viento de baja velocidad para mediciones de ruido.....	27
Figura 3.15. Grafica de velocidad del viento en el túnel en función del ciclo de trabajo	28
Figura 3.16. Punta de prueba termo-anemómetro Dwyer series 471.	29
Figura 3.17. Fuente de corriente empleada en el circuito de medición del termistor.....	29
Figura 3.18. Circuito de medición para la punta del termo anemómetro	30

Figura 3.19. Circuito acondicionador de señal para el sensor de temperatura	31
Figura 3.20. Circuito medición velocidad del viento mediante filamento caliente.....	31
Figura 3.21. respuesta al impuso y frecuencia para el filtro pasa baja.....	32
Figura 3.22. Disminución del Voltaje $V_{Termistor}$ y $V_{Sensor\ temperatura}$ en el tiempo.....	34
Figura 3.23. Voltaje en el termistor en función del voltaje en el sensor de temperatura	34
Figura 3.24. Curva velocidad del viento en función del voltaje de disipación en el termistor	35
Figura 3.25. Diagrama flujo del algoritmo de medición de la velocidad del viento mediante termistor implementado en el microcontrolador STM32F4.....	36
Figura 3.26. Micrófono capacitivo electret Marca Havit HV-M80	37
Figura 3.27. Algoritmos (a) Transformada Rápida de Fourier, (b) Estimación función de masa de probabilidad.....	38
Figura 3.28. Filtro de media móvil empleado como estimador de la velocidad del viento.....	39
Figura 3.29. Algoritmo empleado para encontrar la correlación entre dos señales provenientes de diferentes micrófonos.....	40
Figura 4.1. Distribuciones de probabilidad del ruido inducido.....	42
Figura 4.2. Distribuciones de probabilidad del ruido inducido del viento, con sus respectivas aproximaciones gaussiana	43
Figura 4.3. Transferencia desviación estándar en función de la velocidad del viento para intervalos de adquisición t_{ad} de (a) 0.5 segundos, (b) 2 segundos y (c) 5 segundos.....	45
Figura 4.4. Error típico en la desviación estándar en función del tiempo de adquisición.....	46
Figura 4.5. (a) Error típico de la desviación estándar en función de la velocidad del viento.....	46
Figura 4.6. Espectro ruido inducido sobre el micrófono a diferentes Velocidades del viento.....	47
Figura 4.7. Vista en el plano Frecuencia-Amplitud de los espectros del ruido inducido a diferentes velocidades del viento.	48
Figura 4.8. Valor medio de la señal durante cinco segundos a medida que se varia la velocidad del viento en el túnel.....	49
Figura 4.9. Error típico de la media en función de la velocidad del viento.	50
Figura 4.10. (a) Medición térmica de la velocidad del viento en el túnel durante 200 segundos (b) Medición de la desviación estándar de la señal acústica al aplicar un filtro de media móvil.	51
Figura 4.11. Medición velocidad del viento térmica y acústica.....	52
Figura 4.12. Relación entre valor real de la velocidad del viento y el valor estimado mediante media móvil.....	52
Figura 4.13. Porcentaje de error en función de la velocidad para un conjunto de mil valores.....	53

Figura 4.14. Sensibilidad de la medición en función de la dirección del viento (a) Orientación del micrófono (b) Velocidad en función del ángulo de orientación.....54

Figura 4.15. (a) Primeros 200 valores de desviación estándar para ambos micrófonos a intervalos de 0.25s (b) Señal de cros correlación obtenida del las señales X y Y mostradas en (a).....55

A.1. Medición velocidad del viento térmica y acústica.....61

B.1. Algoritmo masa de probabilidad.....62

B.2. Transformada Rápida de Fourier.....63

B.3. Filtro digital pasa baja de función sinc con ventana de blackman C++ Atollic.....64

B.4. Algoritmo Media Móvil.....65

Índice Tablas

Tabla 3.1 Mediciones de velocidad del viento en función de ciclo de trabajo del PWM.....	27
Tabla 4.1 Velocidad del viento estimada en función de la orientación del micrófono.....	53

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
RTD	Resistance Temperature Detector
SPL	Sound Pressure Level
PWM	Pulse With Modulation
ADC	Analog to Digital Converter
FIFO	First input First Output

Notación General

A Matriz

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

\mathbf{A}^T Matriz transpuesta

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Capítulo 1

Introducción

Costa Rica posee una de las más grandes biodiversidades del planeta, con tan solo una extensión de 51 100 Km² es posible encontrar cinco diferentes tipos de bosque, que corresponden al 34.7% del territorio nacional [1]. Ante la importancia fundamental del bosque costarricense en materia turística y ecológica, es que surge la iniciativa por parte del estado costarricense de proteger las regiones boscosas del país, este proceso es llevado a cabo bajo la tutela del Instituto tecnológico de Costa Rica, que mediante programas tecnológicos busca formular soluciones de protección de los bosques que conforman las distintas reservas naturales del país.

Es en una de estas iniciativas que la Escuela de Ingeniería Electrónica del ITCR busca desarrollar las bases para una red de estaciones de sensores de variables ambientales y patrones atípicos en el bosque, esto a fin de poder detectar a tiempo situaciones que pongan en riesgo la flora y fauna de dichas regiones. Una de estas variables a medir corresponde a la velocidad y dirección del viento, medición fundamental en materia de establecimiento de trayectorias de propagación de incendios en el bosque seco.

Es así como surge la necesidad de medición de la velocidad y determinación de la dirección del viento, sin embargo las soluciones ofrecidas actualmente en el mercado no corresponden a la realidades y restricciones del proyecto, el cual busca la medición de la velocidad del viento con dispositivos cuyo principio de operación no sea mecánico y el costo del mismo sea bajo, esto es justificado debido a que las estaciones de medición una vez instaladas, deben operar libres de mantenimiento por periodos prolongados, además el número de estaciones a instalar hace que no sea posible el optar por las soluciones del mercado que rondan los miles de dólares por anemómetro, como en el caso de equipos ultrasónicos o de filamento caliente.

Como una solución a la problemática anterior se busca el desarrollar un sistema de medición de la velocidad del viento, esto a través del análisis de señales generadas por micrófonos capacitivos, a fin de determinar patrones que puedan ser relacionados directamente con la velocidad del fluido. Así se busca el trasladar la complejidad y costo del sistema de medición, de los sensores hacia el análisis y procesamiento de las señales generadas por elementos de transducción más simples. Para lo anterior se contará con los recursos financieros, técnicos y tecnológicos disponibles en el ITCR, específicamente con el apoyo de la Escuela de Ingeniería Electrónica, encargada principal del macroproyecto de medición de variables atmosféricas y detección de patrones acústicos en el bosque [2].

1.1 Meta y Objetivos del proyecto

Desarrollar un sistema para la medición de la velocidad del viento que emplee como principio de operación el análisis de señales eléctricas generadas por micrófonos.

1.1.1 Objetivo general.

- Medir la velocidad del viento empleando micrófonos para el cálculo de trayectorias de incendios forestales.

Indicador: Alcanzar resolución de medición menor a 0.5 m/s.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Determinar el origen físico de las principales componentes que conforman la señal eléctrica generada por el viento sobre un micrófono.

Indicador: cada una de estas componentes debe corresponder en 10% o más a la potencia total de la señal eléctrica sobre el micrófono.

- Establecer una relación cuantificable entre la velocidad del viento y la señal eléctrica generada por el micrófono.

Indicador: la variable medible debe corresponder como mínimo en un 80% a la velocidad del viento.

- Diseñar un filtro digital para seleccionar las componentes eléctricas más representativas de la velocidad del viento.

Indicador: la variable medible después del filtrado debe corresponder como mínimo en un 90% a la velocidad del viento.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Antecedentes.

El ruido inducido sobre micrófonos ocasionado por el viento, es un fenómeno ampliamente analizado en el diseño de túneles de viento aeroacústicos (ejemplo [3, 4, 5]) así como en la medición de sonido en exteriores [6], teniendo en común los estudios en estos campos, la detección, estimación y eliminación del ruido acústico inducido del viento. Diferentes métodos de eliminación del ruido han sido empleados, teniéndose los más simples, que consisten en pantallas protectoras cubriendo el micrófono realizadas en espumas [5], o empotrar los micrófonos en orificios realizados en paredes [5]. Estas técnicas son capaces de disminuir la velocidad del aire que interactúa con el micrófono, pero no de eliminar las componentes espectrales de baja frecuencia del ruido de fondo.

A fin de suprimir las componentes de frecuencia que contaminan las fuentes acústicas que se desean analizar, se han desarrollado diferentes algoritmos para el procesamiento de las señales electroacústicas, destacándose el filtrado espacial, en el cual un arreglo de sensores (en acústica micrófonos) colecta muestras espaciales de ondas y las procesa de tal forma que sonidos originados de una dirección específica experimenten interferencia constructiva, mientras los alrededores experimenten interferencia destructiva, así es posible separar señales que poseen espectros que se traslapan pero que tienen orígenes espaciales diferentes [8]. Un segundo método consiste en la cancelación adaptativa del ruido, en la cual a una señal fuente contaminada por ruido se le sustrae una señal altamente correlacionada con el ruido que previamente ha sido tratada por un filtro que se adapta (variación de pesos) a fin de replicar el ruido presente en la señal primaria [5]. Igualmente importante resulta la estimación del nivel de presión del sonido a través de la medición de la velocidad del viento, esto a fin de obtener el sonido objetivo empleando la sustracción del ruido estimado [9].

Los estudios sobre la supresión del ruido en micrófonos sientan las bases sobre cual se construyen los modelos lineales y no lineales que relacionan el ruido del viento con la velocidad relativa incidente sobre el mismo.

2.2 Flujo laminar y turbulento.

Fluidos en los cuales la viscosidad resulta importante pueden ser clasificados de dos tipos, laminar y turbulentos. Un flujo puede catalogarse como laminar cuando se observa que el fluido describe trayectorias en línea recta, en capas paralelas, sin que exista mezcla macroscópica entre capas. A medida que la tasa de flujo aumenta más allá de un cierto valor crítico el flujo laminar se rompe en un movimiento irregular, indicando la presencia de mezcla macroscópica del fluido, perpendicular a la dirección de desplazamiento. Este movimiento caótico del fluido es conocido como turbulento [10].

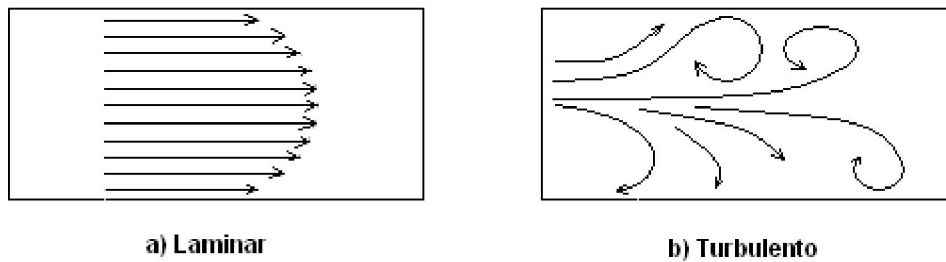


Figura 2.1. Cinemática de flujo laminar y turbulento

2.2.1 Teoría del flujo de fase única

El comportamiento de un fluido puede describirse a través de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales, estas ecuaciones reciben el nombre de ecuaciones de Navier-Stokes [11]. Teniéndose en su forma más general:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F} \quad (1.2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + \mathbf{Q} \quad (1.3)$$

En donde:

ρ densidad (Kg/m³)

\mathbf{u} vector de velocidad (m/s)

p presión (Pa)

τ tensor de estrés de viscosidad (Pa)

\mathbf{F} vector de fuerza de volumen (N/m³)

C_p capacidad de calor específico a presión constante (J/(kgK))

T temperatura absoluta (K)

\mathbf{q} vector de flujo de calor (W/m²)

\mathbf{Q} Fuentes de calor (W/m³)

\mathbf{S} Tensor de esfuerzo:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

Las soluciones analíticas para la ecuación 1.3, excepto para casos triviales, resulta intratables por lo que se requiere de métodos numéricos para determinar el comportamiento e interacción de un fluido con diferentes estructuras.

2.2.2 El límite de número Mach

El número mach de un fluido corresponde a la velocidad de este en comparación con la velocidad del sonido, este número adimensional está dado por:

$$Mach = \frac{|\mathbf{u}|}{a}$$

En donde \mathbf{u} corresponde a la velocidad del fluido y “a” la velocidad del sonido. Un fluido es teóricamente incompresible cuando su número mach es igual a cero. Para números mach menores a un cierto valor crítico no existe implicación numérica en las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo a medida que la velocidad del fluido aumenta la ecuación sufre una transición de parabólica a hiperbólica y las propiedades numéricas de la ecuación de Navier-Stokes cambian [11].

2.2.3 El número de Reynolds

El número de Reynolds es la razón de la fuerza inercial del fluido en comparación con la fuerza viscosa del mismo, matemáticamente se tiene:

$$Re = \frac{F_{inercial}}{F_{viscosa}} \propto \frac{\rho u \frac{\partial u}{\partial x}}{\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} \propto \frac{\rho U^2 / l}{\mu U / l^2} = \frac{Ul}{\nu}$$

En donde:

U es escalar de la velocidad del fluido.

l es longitud característica del sistema.

ν es viscosidad cinemática del fluido.

Para fluidos con número de Reynolds bajo, las fuerzas viscosas son dominantes, por lo tanto las perturbaciones en el fluido tienden a ser minimizadas resultando en un flujo laminar, a medida que el número de Reynolds aumenta, el amortiguamiento en el sistema disminuye, permitiendo que las perturbaciones aumenten, si el número de Reynolds es lo suficientemente alto eventualmente el fluido resultara turbulento.

2.3 Túneles de viento de baja velocidad.

Una parte de suma importancia a la hora de caracterizar dispositivos de medición de flujo, es el entorno sobre el cual se va a realizar las mediciones, ya que dependiendo del control y conocimiento que se tenga sobre el medio, se pueden validar los resultados. Así es necesario el comprender los principales criterios envueltos en el diseño de túneles de viento de baja velocidad.

2.3.1 Principales componentes de un túnel de viento.

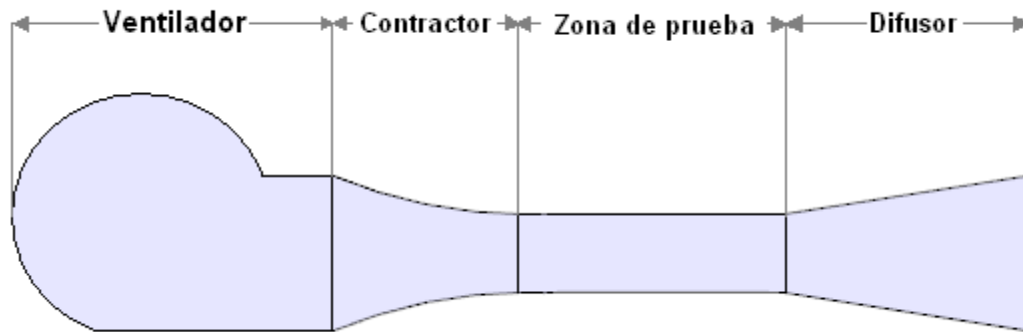


Figura 2.2. Componentes de un túnel de viento

En la figura 2.2 se pueden observar los cuatro componentes principales de un túnel de viento de circuito abierto. El ventilador encargado de poner en movimiento el fluido a través del túnel, el compresor encargado de comprimir el fluido, la zona de prueba en donde se colocan los modelos o instrumental de medición y por último el difusor.

Ventilador: Para el caso de un túnel de viento se debe tener un ventilador que genere un flujo con la menor cantidad de perturbaciones. Generalmente se emplean para túneles de viento ventiladores de abanico de flujo axial, este tipo de ventilador genera diferenciales de presión altos complicando el diseño de los túneles de viento y aumentando el ruido de operación, además el flujo de salida del ventilador presenta un sesgo en la dirección de rotación de las hélices. Una solución a lo anterior consiste en emplear dos abanicos de flujo axial operando en serie con direcciones de rotación opuesta [12]. Otra solución consiste en emplear ventiladores centrífugos, estos operan con quietud y eficiencia dentro de un amplio rango de condiciones de flujo, el ruido y pulsaciones son bajos aun cuando el túnel es operado fuera de las condiciones de diseño, asimismo ventiladores centrífugos con doble entrada de aire tienden a producir flujos uniformemente inclinados sin vórtices a las salidas [13].

Compresor (bellmouth): El compresor es el encargado de disminuir el área de conducción a fin de alcanzar la velocidad deseada en la sección de prueba, a su vez se encarga de atenuar turbulencias indeseadas generadas por el ventilador y de disminuir la capa límite del flujo al mínimo. La contracción generalmente se hace a una relación de 6:1 a 9:1 para aplicaciones de baja velocidad, y la geometría generalmente de un polinomio de grado tres tiene la intención de eliminar cualquier cambio brusco en la dirección del fluido que pueda introducir turbulencias [12].

Sección de pruebas: La sección de pruebas es el corazón del túnel de viento, por tanto su diseño es fundamental, y de este se obtienen los lineamientos para el diseño de las demás secciones del túnel. Se busca que el fluido en esta sección sea laminar y que la capa límite se mantenga al mínimo. Las dimensiones de la sección de pruebas están determinadas por los modelos e instrumentación que se pretenden colocar en esta zona.

Difusor: En esta sección se busca una transición gradual del fluido en donde este disminuya su energía cinética a medida que aumenta la presión esto a fin de disminuir la energía necesaria para operar el túnel. Una regla general para túneles de viento de baja velocidad corresponde a ángulos de inclinación de las paredes del difusor no mayores a 5° y una relación de áreas entrada-salida que no exceda los 2.5 [13].

2.4 Termo Anemómetro.

Un método empleado en la determinación de la velocidad de un fluido, consiste en medir la capacidad que tiene la masa del fluido en movimiento para transportar energía térmica, en la mayoría siendo el coeficiente de temperatura con respecto a la resistividad de un material el objeto de estudio. Al emplear elementos resistivos con coeficientes positivos (PTC) o negativos (NTC) de temperatura es posible inducir un aumento controlado de la temperatura y medir las variaciones de potencia ocasionadas por el fluido sobre el sensor.

2.4.1 Filamento caliente

La anemometría de filamento caliente consiste en la utilización de materiales cuya resistencia esté relacionada con la temperatura a la que dicho material está expuesto, siendo el material más empleado el Tungsteno, en donde aprovechando las características resistivas de un filamento se aumenta su temperatura por encima de la temperatura del fluido, para luego medir la potencia disipada que es función directa de la velocidad la masa de aire. La medición de la velocidad de un fluido empleando filamento caliente presenta ventajas como lo son medir un amplio rango de velocidades y detección de turbulencias sobre el fluido, esto gracias a la alta respuesta dinámica de las sondas debido a la pequeña inercia térmica que presentan los filamentos. Dadas las dimensiones de las sondas se obtiene mediciones con baja perturbación sobre el fluido.

La ecuación (1.7) describe la física que gobierna el comportamiento del filamento caliente, en donde se observa que la energía W en Jules que es suministrada al filamento, es igual a la proporción de energía que es entregada al medio Q , más la tasa de cambio de la energía almacenada en el filamento Q_i .

$$W = Q + \frac{dQi}{dt} \quad (1.7)$$

$$I_w^2 R_w = Q + \frac{dQi}{dt} \quad (1.8)$$

Además, se tiene que la energía suministrada al filamento está dada por la potencia $W = I_w^2 R_w$, así resulta en una relación eléctrica-térmica dada por la ecuación (1.8), si el filamento térmicamente estable dQi/dt puede ser despreciado resultando en una relación directa entre la potencia suministrada y la energía entregada al medio, siendo Q:

$$Q = Q_{Fc} + Q_{Nc} + Q_R + Q_C \quad (1.9)$$

Q_{Fc} : Energía liberada mediante convección forzada.

Q_{Nc} : Energía liberada mediante convección natural.

Q_R : Energía radiada.

Q_C : Energía conducida al medio.

Para la ecuación (1.9) se tiene que la mayor cantidad de energía liberada está dada por la convección forzada que genera el fluido sobre el filamento, por lo que se puede asumir que $Q \approx Q_{Fc}$, y conociendo:

$$Q_{Fc} = (T_w - T_a)\phi(U_{flow}) \quad (1.10)$$

En donde

T_w : Temperatura del filamento

T_a : Temperatura del fluido

$\phi(U_{flow})$: Dependencia de la convección forzada de la velocidad del fluido.

Se puede expresar (1.8) de la siguiente forma:

$$I_w^2 R_w = (T_w - T_a) \phi(U_{flow}) \quad (1.11)$$

Por último, sabiendo que las características del material originan que la resistencia del filamento sea función de la temperatura se tiene:

$$R_w = R_0 [1 + \chi(T_w - T_0)] \quad (1.12)$$

$$R_a = R_0 [1 + \chi(T_a - T_0)] \quad (1.13)$$

Despejando T_0 en (1.12) y (1.13) e igualando ambos términos:

$$\frac{1}{\chi} \left[\frac{R_w}{R_0} - 1 \right] - T_w = \frac{1}{\chi} \left[\frac{R_a}{R_0} - 1 \right] - T_a$$

$$T_w - T_a = \frac{1}{\chi R_0} [R_w - R_a] \quad (1.14)$$

La ecuación (1.14) puede ser empleada en (1.11) a fin de obtener:

$$I_w^2 R_w = \left(\frac{1}{\chi R_0} [R_w - R_a] \right) \phi(U_{flow}) \quad (1.15)$$

De (1.15) se puede observar que es posible el mantener la corriente constante y medir la caída de potencial sobre el filamento, este enfoque es conocido como anemómetro de corriente constante, así como manteniendo la resistencia constante en el filamento y midiendo la corriente necesaria para mantener la temperatura del filamento a un valor específico se puede desarrollar una anemómetro de temperatura constante [14].

2.4.2 Termistores

Un termistor es un dispositivo que exhibe un cambio en su resistencia debido a un cambio en su temperatura, aquellos que experimentan aumentos en su resistencia a medida que la temperatura aumenta se conocen como termistores de coeficiente positivo (PTC por sus siglas en inglés Positive Temperature Coefficient) de lo contrario si su resistencia disminuye al aumento de la temperatura reciben el nombre de termistores de coeficiente negativo NTC. Un termistor puede diferenciarse de los materiales comúnmente utilizados en la anemometría de filamento caliente, comúnmente llamados RTD (Resistance Temperature Detectors) en que debido a sus compuestos de fabricación, siendo generalmente óxidos metálicos mezclados con cerámicas, son capaces de experimentar grandes cambios en su resistencia de operación con respecto a variaciones en la temperatura, a diferencia de los RTD compuestos mediante aleaciones metálicas y cuya variación en la resistencia es pequeña con respecto a variaciones en la temperatura. El comportamiento anteriormente descrito puede ser observado en la figura 2.3, en donde se observan las variaciones respectivas en la resistencia tanto para un RTD como para un grupo de termistores NTC.

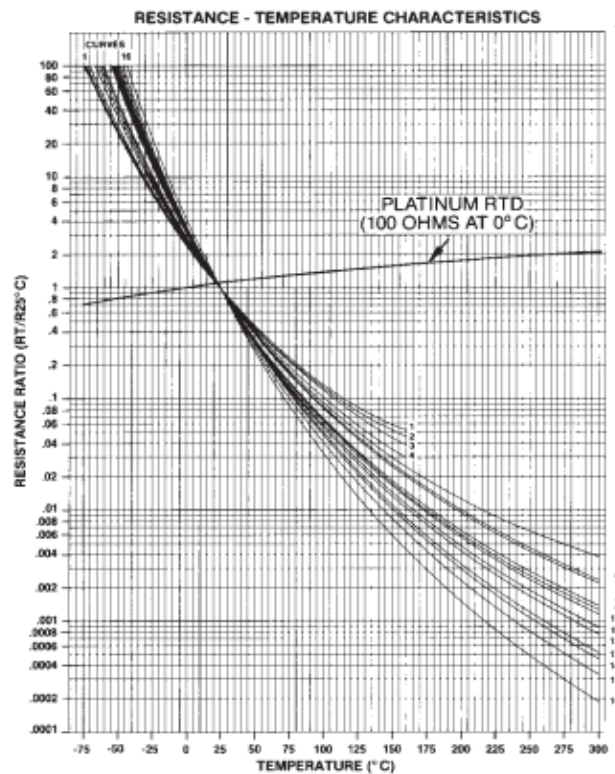


Figura 2.3. Resistencia en función de la temperatura (Termistores NTC y filamento RTD)

El comportamiento de un termistor NTC puede ser descrito mediante la ecuación de tercer orden de Steinhart-Hart, esta ecuación se muestra en (1.16) en donde a , b y c son conocidos como los coeficientes de Steinhart-Hart que generalmente son suministrados por el fabricante [15].

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln^3(R) \quad (1.16)$$

T: Temperatura del termistor en Kelvin.

R: Resistencia del termistor

Actualmente existe un aumento en el uso de termistores como elementos sensibles en mediciones de termo anemometría, esto debido a su gran resolución, su bajo costo, su resistencia mecánica-química y su velocidad de respuesta, que a medida que los dispositivos NTC se escalan su inercia térmica disminuye, además la homogeneidad en su manufactura origina que estos no impliquen costos de calibración durante la instalación [13].

2.5 Micrófono capacitivo

Un micrófono capacitivo es un transductor acústico que convierte sonido en señales eléctricas, esto a través de una interface acústico-mecánica que convierte presión de sonido en desplazamiento mecánico y otra interface mecánica-eléctrica encargada de cuantizar dichos desplazamientos mecánicos en su correspondiente valor eléctrico. Lo anterior es llevado a cabo mediante el principio de capacitor de placas paralelas, empleando como dieléctrico aire, así una membrana móvil es capaz de vibrar variando la capacitancia entre placas del dispositivo y con esto el potencial medible entre terminales.

La figura 2.4 muestra un esquema de micrófono capacitivo, en donde se muestra que el micrófono posee un desplazamiento inicial en su membrana debido a atracción eléctrica ocasionado por la acumulación de cargas en las placas del capacitor, las variables mostradas en la figura corresponden a los valores principales que describen el modelo de vibración de una membrana correspondientes a la ecuación (1.17).

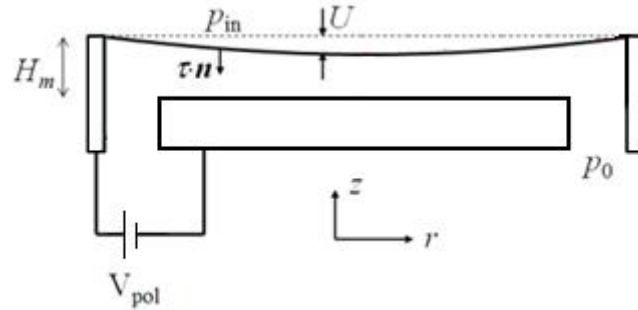


Figura 2.4. Esquematzación de un micrófono capacitivo incluyendo variables y sistema de coordenadas

La ecuación 1.17 muestra la ecuación que gobierna el desplazamiento U de una membrana bajo una tensión constante T_m , en donde r es la coordenada radial, t es el tiempo, ρ_{ms} es la densidad superficial, F_s es la suma de fuerzas superficiales sobre la membrana [16].

$$T_m \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial t} \right) - \rho_{ms} r \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - r F_s = 0 \quad (1.17)$$

2.5.1 Ruido del viento inducido sobre micrófonos

Es conocido que el ruido inducido sobre micrófonos por el viento posee una fuerte correlación con la velocidad del fluido (ejemplo [6], [7], [9]) en donde el nivel de presión de sonido (SPL por sus siglas en inglés Sound Pressure Level) aumenta a medida que la velocidad del viento lo hace, sin indicios de descensos en el SPL [7].

Es posible emplear modelos lineales y no lineales para estimar el SPL del ruido del viento sobre un micrófono, empleando para esto mediciones de la velocidad del viento, y se ha demostrado [9] que aun un modelo lineal simple puede aproximar la tendencia del ruido del viento sobre el micrófono.

Empleando un modelo lineal de media móvil (Ver figura 2.5) se tiene:

$$SPL_k = \sum_{i=P}^F [a_i * v_{k-i}] + b + \epsilon_{rr}$$

En donde:

SPL_k : Nivel de presión de sonido estimada sobre el micrófono.

a_i : Pesos de la media móvil.

v_{k-i} : Velocidades del viento empleados para estimar SPL

b : Nivel de polarización.

ϵ_{rr} : Error del modelo.

P : Cantidad de valores en el pasado de velocidad del viento.

F : Cantidad de valores en el futuro de la velocidad del viento.

Así contándose con anterioridad con un conjunto de valores de velocidad del viento $v_0, v_1, v_2 \dots v_j$, adquiridos en instantes $t_0, t_1, t_2 \dots t_j$ es posible estimar el ruido sobre el micrófono en nivel de presión de sonido, comprendido entre el intervalo $[t_p, t_{j-F}]$.

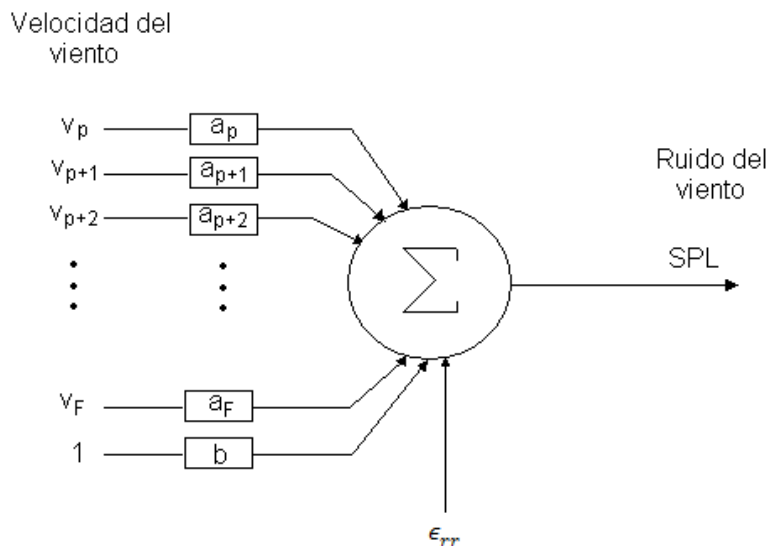


Figura 2.5. Estructura del modelo de media móvil

La media móvil es considerada un filtro, cuyo desempeño es óptimo cuando el objetivo es reducir el ruido aleatorio mientras se retiene la forma del impulso escalón. La media móvil es un filtro de primera clase para procesar señales en el dominio del tiempo, sin embargo es uno de los peores filtros en el dominio de la frecuencia, por su poca capacidad de separar una banda de frecuencias del espectro de una señal [17].

Capítulo 3

Mediciones acústicas

3.1 Implementación túnel de viento

3.1.1 Dimensionamiento de secciones túnel viento

El dimensionamiento del túnel de viento inicia con la determinación de las capacidades de la zona de prueba, esta por naturaleza es determinada por el modelo a analizar, o en su defecto dados los intereses del proyecto, las dimensiones de las puntas de prueba a ubicar en esta sección. El instrumental necesario en la zona de pruebas comprende sensores acústicos (micrófonos) para la medición del ruido inducido del viento y una punta de pruebas termo-anemométrica a fin de validar las mediciones acústicas. En la figura 3.1 se muestran los tipos de micrófonos a utilizar en la sección de prueba, la punta de filamento caliente y sus respectivas dimensiones.

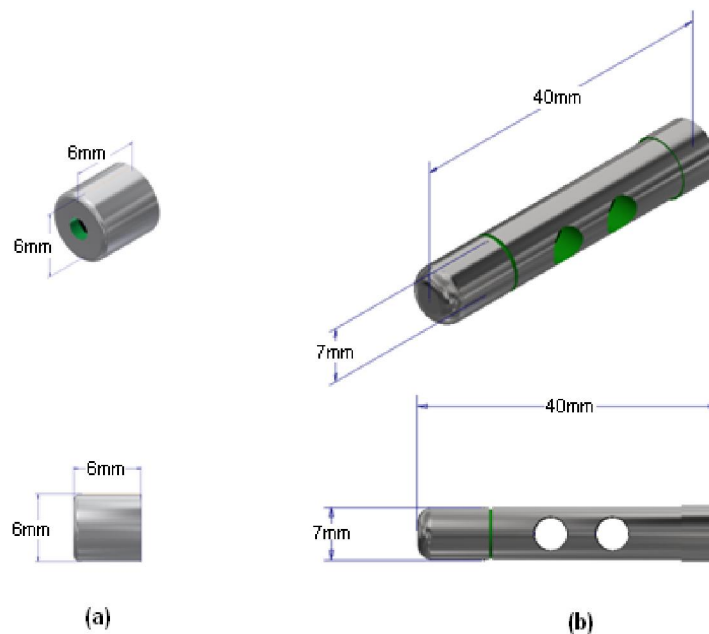


Figura 3.1. Esquemas de los instrumentos de medición ubicados en la sección de prueba (a) Micrófono capacitivo (b) Punta de filamento caliente.

Escogiéndose una sección de pruebas cuadrada, debido a la facilidad de construcción que presenta para las otras secciones del túnel, la dimensión de las paredes la determina la máxima longitud del instrumental a colocar, que corresponde según la figura 3.1 a la punta de prueba de filamento caliente. Las paredes se definen en el doble de la longitud máxima más dos veces la capa límite que se asume sea de 1cm.

$$d = 2l_{max} + 2C_l$$

$$d = 2 * (40mm + 10mm) = 100mm$$

El flujo saliente de la contracción toma alrededor de $0.5 d$ antes que las perturbaciones sean reducidas por debajo de un cierto nivel aceptable, a la vez si una red anti-turbulencia es instalada se debe dejar de entre 5 a 10 veces la longitud de la red [13]. Dado que no se cuenta con una red anti-turbulencia, la dimensión mínima para la longitud de la sección de pruebas está dada por:

$$L_{min} > 0.5d = 0.5 * 100mm = 50mm$$

Se define la longitud de la sección de pruebas como 5 veces L_{min} , una longitud mínima para reducción de uniformidades y cuatro unidades para colocar el instrumental de medición, resultando en una longitud de 250mm. La sección de pruebas resultante se muestra en la figura 3.2.

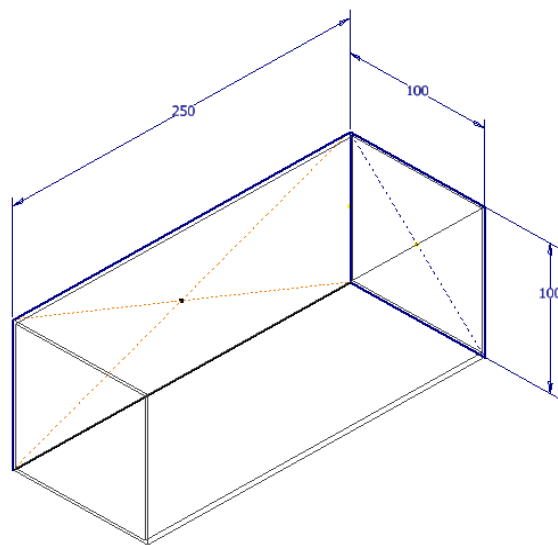


Figura 3.2. Sección de pruebas del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros

Una vez teniéndose la sección de pruebas, se pueden definir las características de la contracción y del difusor de salida. Para el difusor se tiene que la relación de áreas no debe sobrepasar 2.5, así:

$$A_{difsalida} \leq 2.5A_{difentrada}$$

$$A_{difsalida} \leq 250\text{mm}^2$$

$$d_{difsalida}^2 \leq 250\text{mm}^2$$

Resulta para una sección cuadrada en el difusor que los lados correspondan a $d_{outlet} \leq 15.81\text{mm}$. Asignándose un valor definitivo de $d_{outlet} = 15\text{mm}$. Ahora dada la restricción impuesta por el ángulo de apertura de las paredes de difusor que debe ser no mayor a 5° , es necesario encontrar la longitud mínima del difusor que cumple con lo anterior, teniéndose:

$$L_{difmin} \geq \frac{\frac{d_{difsalida} - d_{difentrada}}{2}}{\tan(5^\circ)}$$

$$L_{difmin} \geq 28.57\text{mm}$$

Se define la longitud del difusor igual a $L_{dif} = 30\text{mm}$. El difusor resultante se muestra en la figura 3.3.

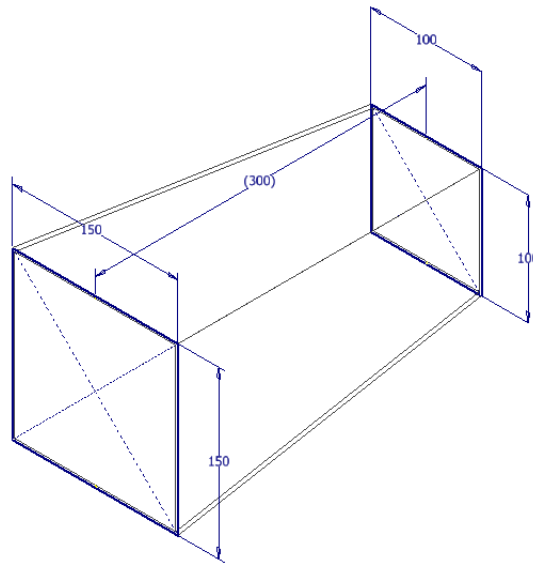


Figura 3.3. Difusor del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros

En el caso de la contracción se tiene una razón de área fija dada por:

$$\frac{A_{comp_entrada}}{A_{comp_salida}} = \frac{280mm^2}{100mm^2} = 7.84$$

Si bien la recomendación para túneles de viento de baja velocidad comprende una razón de área de 10:1, la restricción impuesta por el ventilador axial cuyas paredes a la salida posee una dimensión fija de 280 mm resulta en una relación de 7.84:1.

En el caso de la geometría de la reducción, se emplea un polinomio de grado tres [19], dado por la ecuación:

$$Y(x) = \frac{d_{comp_entrada}}{2} - \left(\frac{d_{comp_entrada} - d_{comp_salida}}{2} \right) [3x^2 - 2x^3]$$

Para $d_{comp_entrada} = 0.28m$ y $d_{comp_salida} = 0.10m$ y desnormalizando la ecuación para una longitud de la zona de compresión de 0.3m resulta en:

$$Y(x) = 0.14m - 0.9m \left[3 \left(\frac{x}{0.3} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{0.3} \right)^3 \right] \quad (1.18)$$

La curvatura resultante de las paredes del compresor se muestra en la figura 3.4.

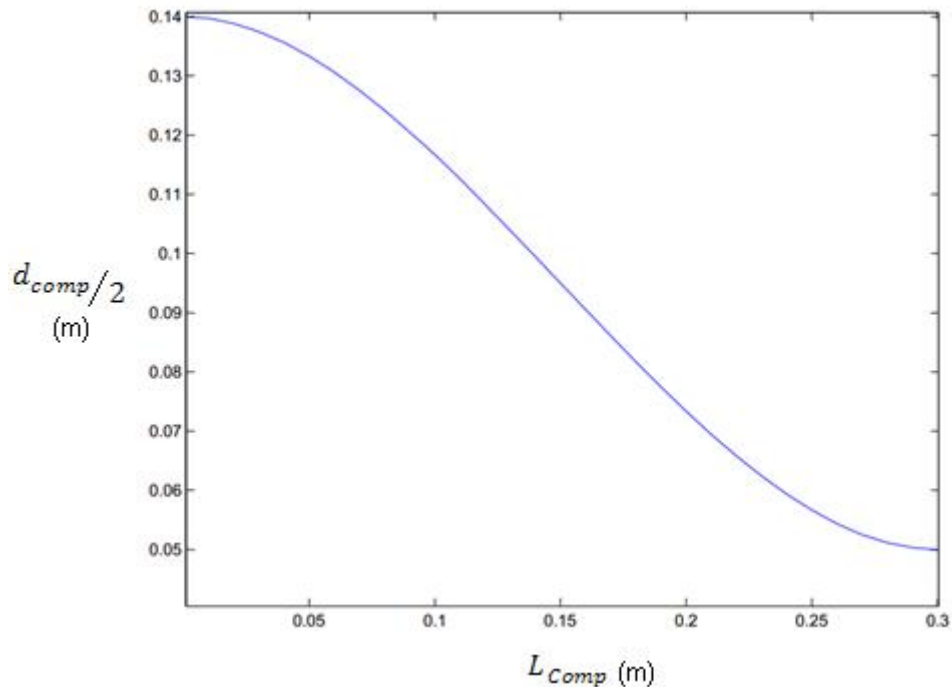


Figura 3.4. Curvatura resultante para las paredes del compresor según la ecuación (1.18)

La figura 3.5 muestra la contracción resultante al aplicar la curva mostrada en la figura 3.4 a las paredes de la sección del compresor.

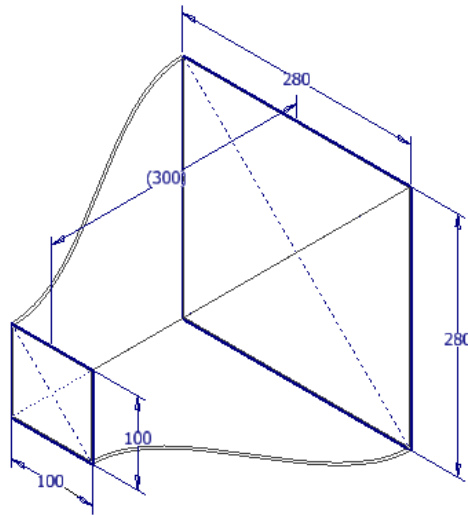


Figura 3.5. Compresor del túnel de viento, con sus respectivas dimensiones en milímetros

Por último se tiene un ventilador centrífugo de 24cm de diámetro y 44 aspas, impulsado por una maquina asincrónica trifásica operada en modo monofásico mediante un capacitor de desfase. Para un volumen total del ventilador de 0.151m^3 como el que se muestra en la figura 3.6.

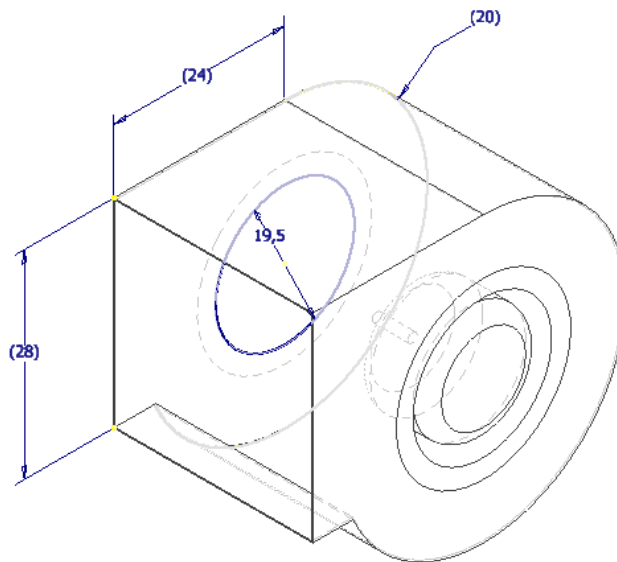


Figura 3.6. Ventilador centrífugo impulsado por motor de inducción, con sus respectivas dimensiones en centímetros

Al unir todas las secciones anteriores resulta en el túnel de viento mostrado en la figura 3.7.

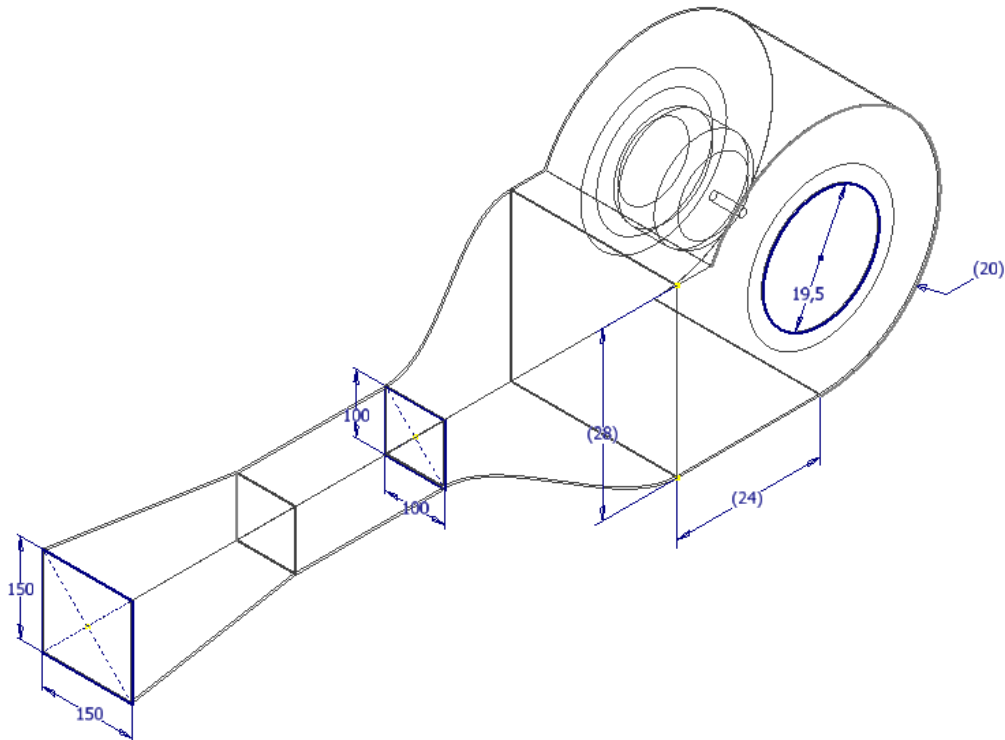


Figura 3.7. Túnel de viento de baja velocidad para mediciones de ruido Inducido sobre micrófonos

Como primera simulación del diseño se utiliza el software TunnelSim, este programa ayuda al diseño de túneles de viento mediante la resolución de las ecuaciones de continuidad para las dimensiones y geometrías definidas por el usuario, alertando si el difusor experimenta separación del fluido o si la velocidad en la sección de pruebas sobrepasa las 300mph (fluido compresible) [18].

En la figura 3.8 se resumen los resultados desplegados por TunnelSim obtenidos en la sección de pruebas. Para valores de velocidad superiores a 13.76 m/s del aire que entra a la contracción, el flujo se vuelve compresible imponiendo un límite superior a la velocidad.

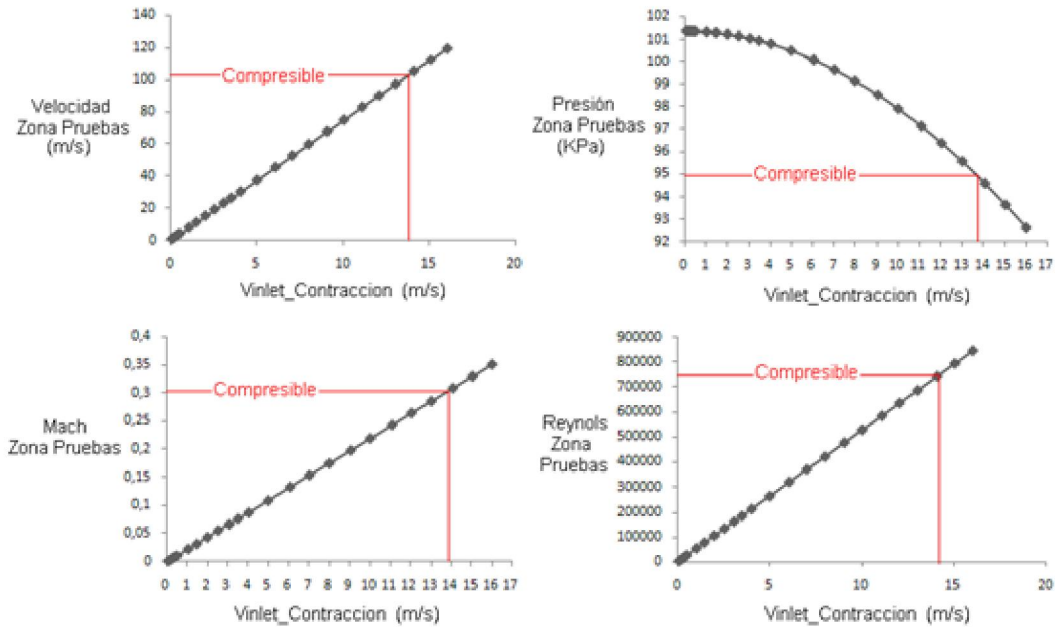


Figura 3.8. Graficas de variables físicas en el túnel de viento a medida que aumenta la velocidad del aire que ingresa a la contracción

Empleando la herramienta Comsol Multiphysics se realiza simulaciones sobre el comportamiento del aire en el túnel, en donde es posible observar, gradientes de velocidad, distribución de presión, capa limite y separación de fluido en el difusor. Los resultados se muestran en las figuras 3.9 y 3.10.

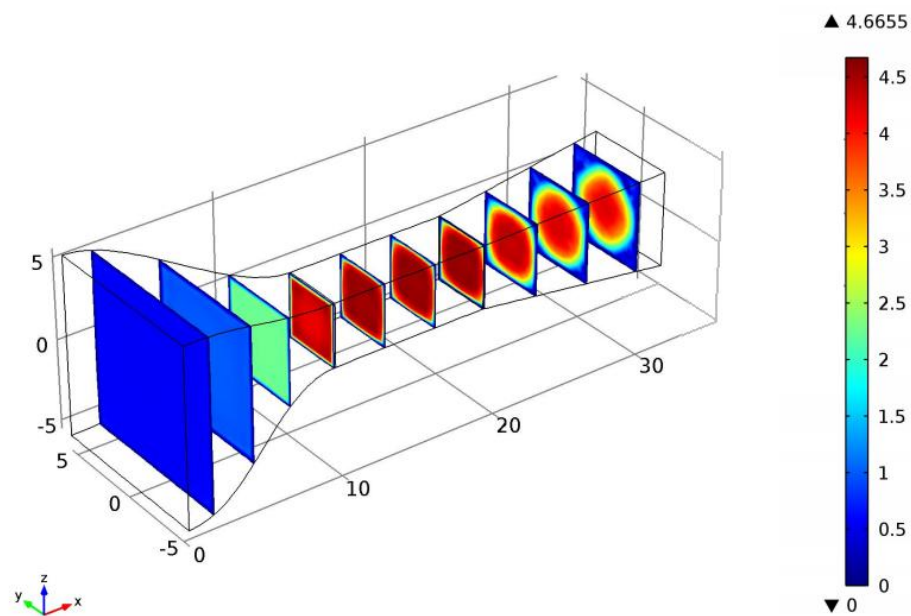


Figura 3.9. Distribución de velocidades en el túnel de viento (Dimensiones en pulgadas, velocidad entrada 1 m/s)

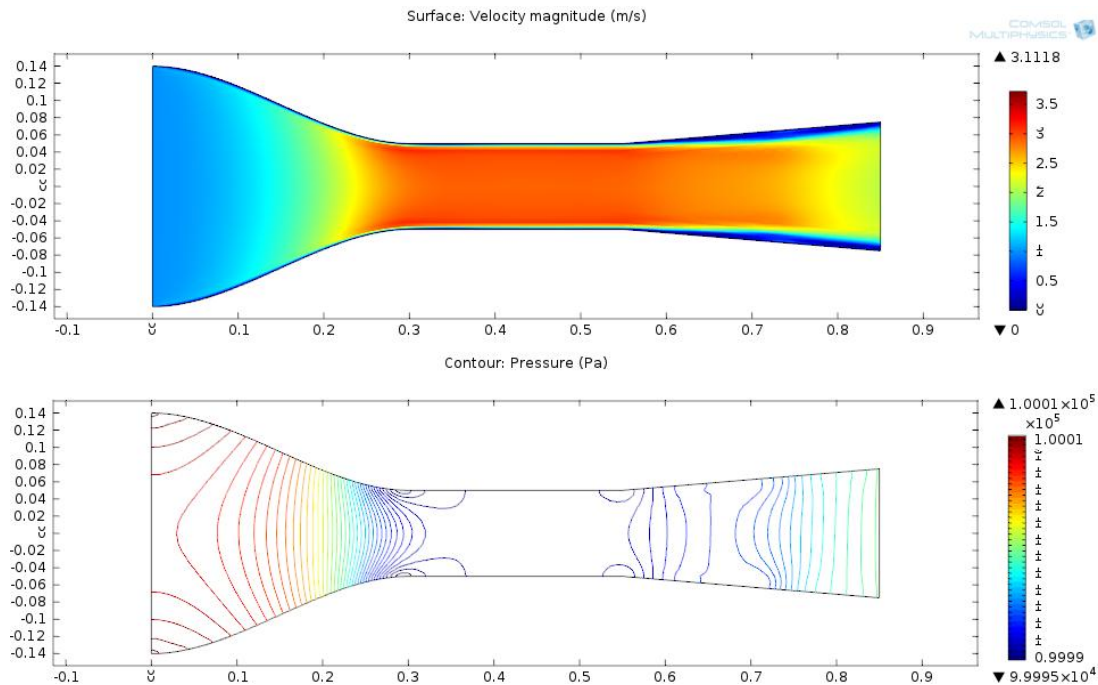


Figura 3.10. Sección transversal del túnel de viento tanto para distribución de velocidades como para distribución de presión (velocidad entrada 0.5m/s, Presión 100 KPa)

Se observa de la figura 3.10 que tanto la presión como la velocidad se mantienen constantes para la sección de pruebas.

3.1.2 Circuito control de velocidad del ventilador centrífugo.

La velocidad del aire en el túnel de viento debe variar a fin de poder analizar el ruido inducido sobre micrófonos, dado que se cuenta con una maquina asincrónica trifásica la cual presenta una conexión monofásica a través de un capacitor de desfase, es posible variar la velocidad del motor bajo de las tres formas mostradas por la ecuación (1.19).

$$n = \frac{f_1}{P_1} (1 - S) \quad (1.19)$$

En donde:

- n : Velocidad motor.
- f_1 : Frecuencia de operación.
- P_1 : Números de polos.
- S : Deslizamiento rotor-estator

Se implementa un variador de velocidad basado en el deslizamiento rotor-estator mediante ciclo convertidor de encendido-apagado esto debido a:

- Control simple.
- Sencillez de diseño e implementación.
- Bajo torque de arranque por parte del ventilador
- No necesidad de control lineal de la velocidad del motor.
- Atenuación mecánica por parte del propulsor del ventilador que actúa como un volante de inercia.

En la figura 3.11 se muestra el diagrama de bloques del ciclo convertidor encargado de variar la velocidad del túnel de viento.

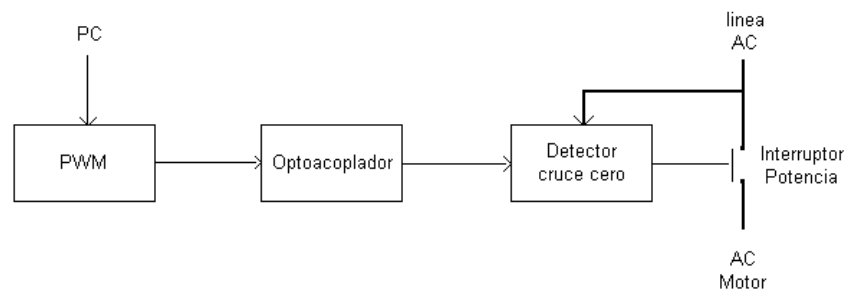


Figura 3.11. Diagrama de bloques circuito controlador de velocidad para ventilador centrífugo

Para el PWM del circuito se tiene que la frecuencia de operación está dada por:

$$f_{PWMk} = \frac{f_{AC}}{k}$$

En donde:

f_{PWMk} : Frecuencia de operación del PWM.

f_{AC} : Frecuencia de la línea de potencia alterna.

k : Numero de pasos de velocidad ($k = 1, 2, \dots, f_{AC}$)

Así, para una línea de 60Hz y 30 velocidades diferentes, se tienen una frecuencia de operación del PWM de 2 Hz y una variación de ancho de pulso de 1/60Hz. En la figura 3.12 se muestran las formas de onda del control. El PWM emplea el microcontrolador PIC18F4550 y el ajuste del ancho de pulso se da a través de una interface serial RS232 con el ordenador.

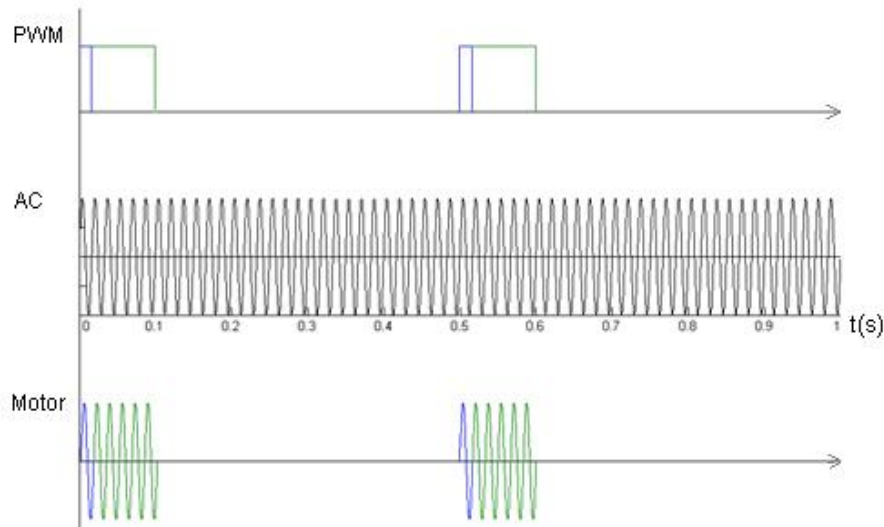


Figura 3.12. Formas de onda para la tensión resultante suministrada al motor del ventilador

Para el caso del acople óptico entre control y potencia se tiene el MOC 3041, el cual cuenta a su vez con un detector de cruce por cero integrado en su etapa de potencia, y el BTA4160 es el encargado de suministrar energía al motor. El circuito completo correspondiente al diagrama del controlador de velocidad se muestra en la figura 3.13.

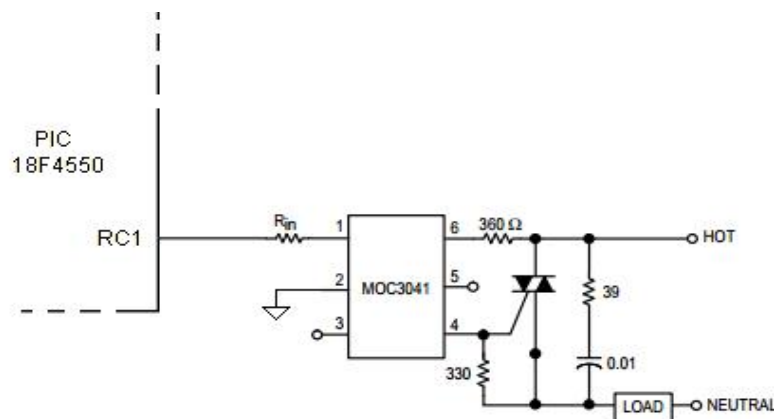


Figura 3.13. Circuito control de ancho de pulso para variador de velocidad del motor de inducción según recomendaciones del fabricante.

3.1.3 Implementación del túnel de viento

El túnel de viento diseñado en las secciones anteriores es implementado mediante cartón de construcción, dado la facilidad de trabajo que presenta el material así como su costo. En la figura 3.14 se muestra la implementación física del túnel de baja velocidad y el respectivo controlador de velocidad para el ventilador centrífugo.



Figura 3.14. Implementación túnel de viento de baja velocidad para mediciones de ruido Inducido sobre micrófonos

Empleando un anemómetro de hélice marca kestrel, modelo 1000 se mide las diferentes velocidades del túnel de viento en función de cantidad de ciclos de trabajo suministrados por el controlador (ver figura 3.12). Los resultados se muestran en la tabla 3.1 y su correspondiente grafica en la figura 3.15.

Tabla 3.1. Mediciones de velocidad del viento en función de ciclo de trabajo del PWM

Ciclo Trabajo (%)	Velocidad (m/s)	Ciclo Trabajo (%)	Velocidad (m/s)
15	2.2	60	5.5
20	2.6	65	5.9
25	3	70	6
30	3.5	75	6.5
35	3.8	80	6.8
40	4.3	85	7.1
45	4.7	90	7.3
50	4.9	95	7.5
55	5.2	100	7.6

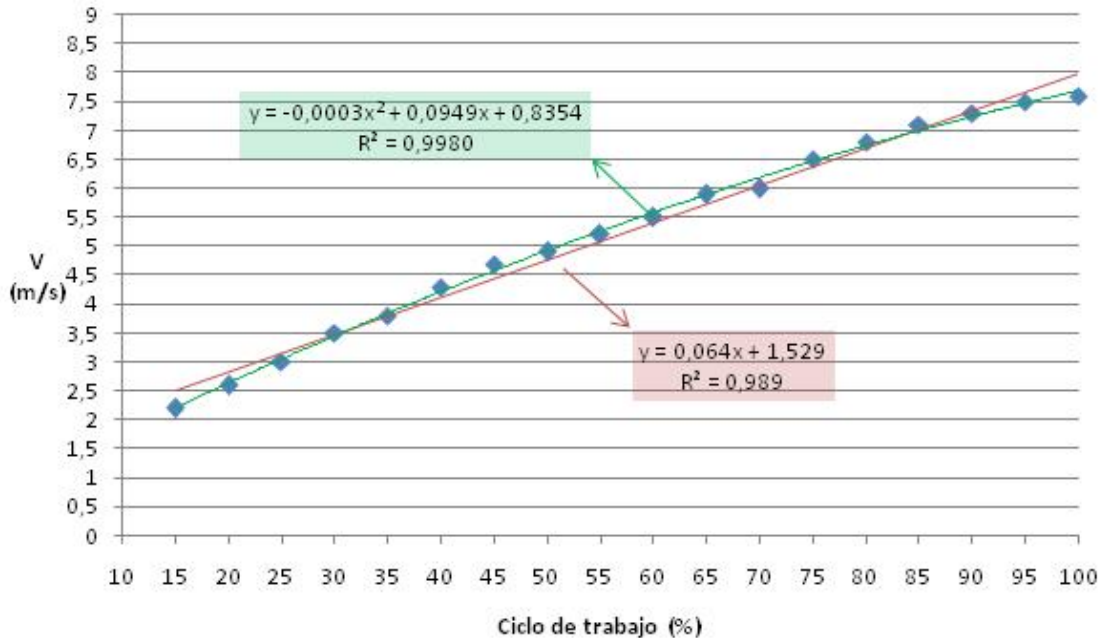


Figura 3.15. Grafica de velocidad del viento en el túnel en función del ciclo de trabajo

En la figura 3.15 se muestra el comportamiento de la velocidad del viento en la sección de pruebas a medida que se aumenta el ciclo de trabajo del PWM. Para valores inferiores a una excursión del 15% la inercia del sistema evita que la hélice del ventilador se mueva de forma sostenida. Se observa él como la velocidad mantiene una relación polinómica de segundo orden, sin embargo a fines prácticos se puede aproximar a una relación lineal dada por la ecuación:

$$V_{viento} = 0.064Ciclo_{PWM} + 1.53 \quad [m/s]$$

A pesar de que el control implementado para el motor de inducción del ventilador centrífugo no es el óptimo, se obtienen buenos resultados en cuanto a la linealidad en relación a la velocidad, esto gracias a la inercia del propulsor y el torque del ventilador como función proporcional a la velocidad de fluido.

3.2 Medición de filamento caliente

3.2.1 Circuito corriente constante.

Para realizar mediciones de velocidad del viento y validar las mediciones acústicas se tiene la punta de prueba mostrada en la figura 3.1 (b) y figura 3.16, que corresponde a la punta de medición de un termo-anemómetro Dwyer. Este emplea como elemento activo un termistor NTC, y a su vez comprende un sensor de temperatura para compensar la desviación en las mediciones ocasionadas por cambios en la temperatura del fluido.

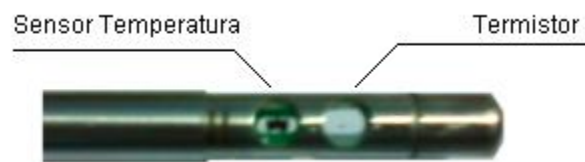


Figura 3.16. Punta de prueba termo-anemómetro Dwyer series 471.

A fin de determinar el valor de la corriente que se debe suministrar al termistor se debe:

- Encontrar el valor de resistencia del termistor a temperatura ambiente: El termistor es colocado en serie con un resistor de $15\text{ K}\Omega$ y alimentando el divisor de tensión con 5 V resulta en una resistencia medible a temperatura ambiente de $1059\ \Omega$.
- Encontrar la máxima potencia de operación que resulte segura para el termistor a 5 V : Se cambia la resistencia de $15\text{ K}\Omega$ por una de $1\text{ K}\Omega$, se obtiene la máxima transferencia de potencia hacia el termistor que corresponde a 6.25 mW .

Empleando un enfoque de anemometría de corriente constante, se emplea una fuente de corriente de 4.5 mA y se verifica que la potencia suministrada al termistor a temperatura ambiente no sobrepase la máxima transferencia de potencia. En la figura 3.17 se muestra la fuente de corriente empleada, resultando en un voltaje ambiente de 1.38 V y una potencia de 6.21 mW .

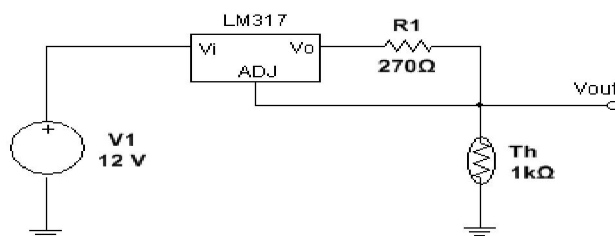


Figura 3.17. Fuente de corriente empleada en el circuito de medición del termistor NTC de una punta de pruebas Dwyer 471.

El sensor de temperatura se alimenta con 5V a través de una resistencia de 1KΩ como se muestra en la figura 3.18.

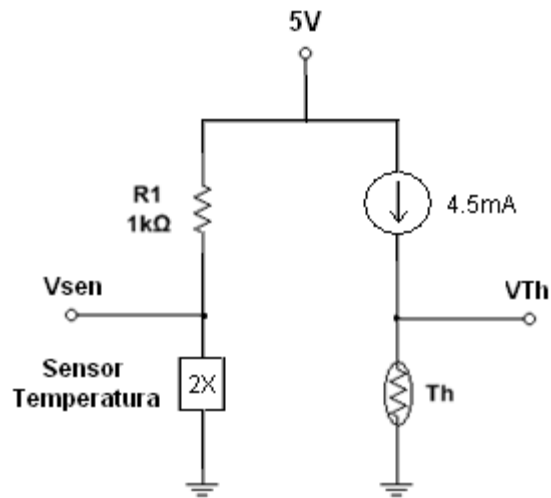


Figura 3.18. Circuito de medición para la punta del termo anemómetro

3.2.2 Circuitos acondicionadores de señal

El circuito mostrado en la figura 3.18 es capaz de entregar en su salida V_{sen} , voltajes comprendidos entre 0.65 y 0.82V, teniéndose un rango de conversión del ADC de 0 a 3V se emplea un amplificador inversor-noinversor en donde:

$$A_{v_{noinv}} = \frac{3V}{(0.82V - 0.65V)} = 17.65 \text{ V/V}$$

$$A_{v_{inv}} = \frac{3V}{(0.82V - 0.65V)} - 1 = 16.65 \text{ V/V}$$

$$V_{offset} = \frac{0.65V * 17.65 \text{ V/V}}{16.65 \text{ V/V}} = 0.689V$$

Se emplea $R_{f1}=100 \text{ K}\Omega$ y $R_1=5.66 \text{ K}\Omega$ a fin de dimensionar el circuito de la figura 3.19.

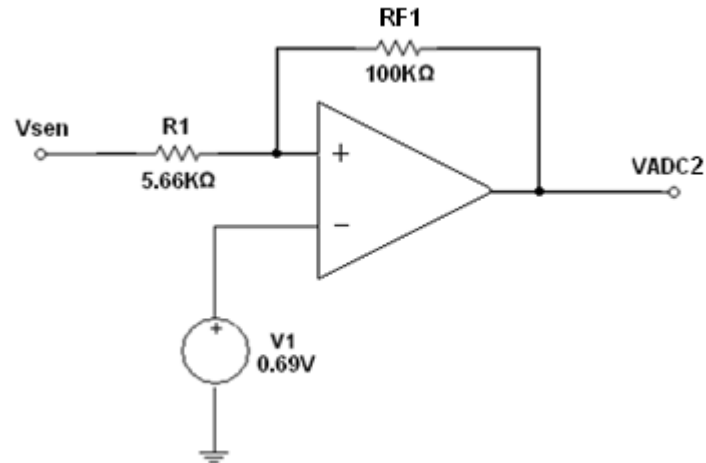


Figura 3.19. Circuito acondicionador de señal para el sensor de temperatura

Para el termistor se tienen voltajes V_{Th} comprendidos entre 1.4 y 2.6V. Un análisis idéntico al anterior conlleva a los valores de: $Av_{noinv}=2.5V/V$, $Av_{inv}=1.5V/V$ y $V_{ofset}=2.33V$. Dado un valor de $Rf2$ de 100 KΩ, $R2$ corresponde a 40 KΩ. En la figura 3.20 se muestra el circuito analógico encargado de adecuar las señales necesarias para digitalizar, a fin de medir la velocidad del viento.

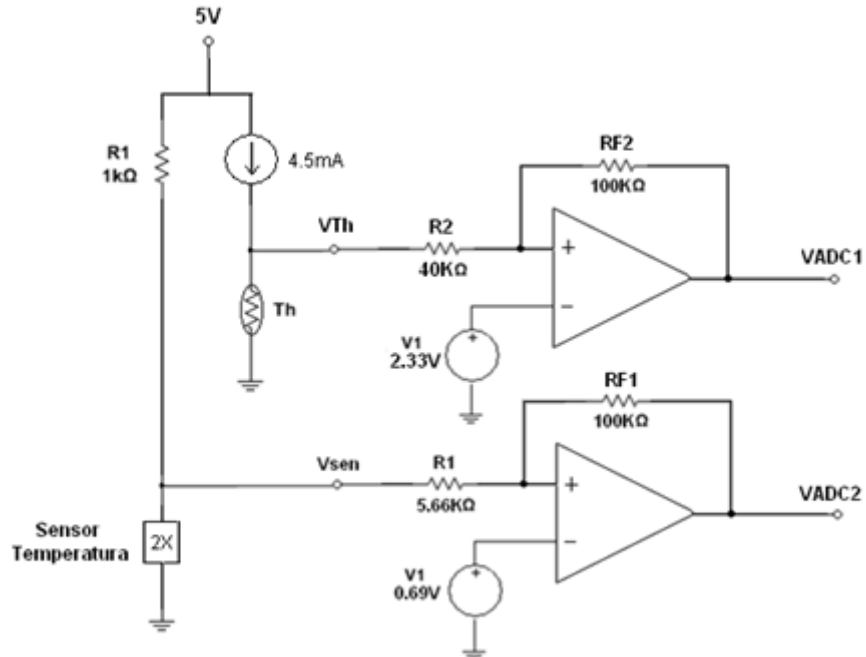


Figura 3.20. Circuito medición velocidad del viento mediante filamento caliente

3.2.3 Digitalización y procesamiento

El microcontrolador ARM STM32F4 como núcleo de una tarjeta STMDiscovery es el encargado de realizar las conversiones análogo-digitales mediante dos de sus tres convertidores flash de 2 Msps y 12 bits. Estos dos ADCs operan en paralelo en donde sus resultados realizan una transferencia directa a memoria a través de un modulo DMA. Estos datos son leídos de la memoria cada 1ms para ser incluidos en dos colas FIFO de 100 muestras cada una, sobre las que se aplica un filtro digital pasa baja de función sinc con ventana de blackman.

$$filter(k) = \begin{cases} \frac{2.3 \operatorname{sen}\left(2\pi \frac{100}{1000}[k-50]\right)}{(k-50)} \left(0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi k}{100}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi k}{100}\right)\right) & k \neq 50 \\ 2.3 \left(2\pi \frac{100}{1000}\right) & k = 50 \end{cases} \quad (1.21)$$

La ecuación (1.21) muestra el kernel del filtro digital cuya frecuencia de corte f_c corresponde a 100Hz. La respuesta al impulso y frecuencia del filtro se muestran en la figura 3.21.

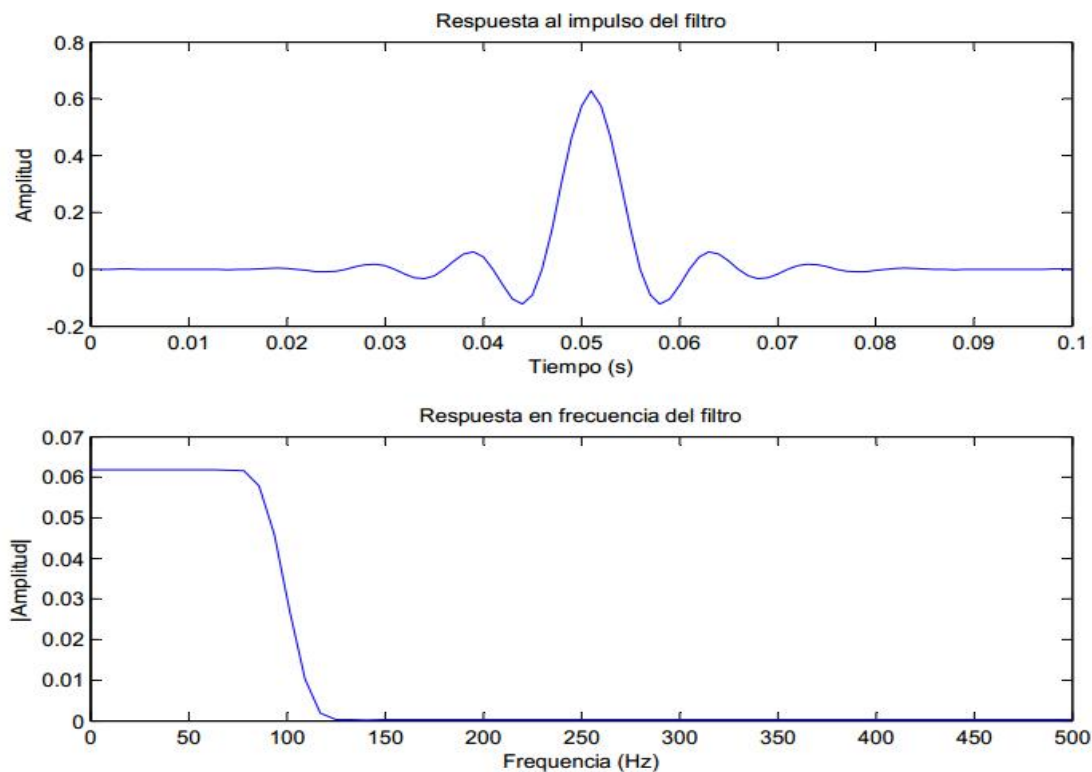


Figura 3.21. respuesta al impuso y frecuencia para el filtro pasa baja de la ecuación (1.21)

las señales de salida son obtenida mediante la convolución de los $M=100$ valores en cada una de las colas con los pesos del filtro (ecuación 1.22).

$$sign_{out}[i] = \sum_{j=0}^{M-1} filter[j] sign_{in}[i - j] \quad (1.22)$$

Del proceso anterior se obtienen dos señales filtradas correspondientes al ADC1 ($V_{Termistor}$) y al ADC2 ($V_{Sensor\ temperatura}$). El voltaje en el termistor se puede expresar como:

$$V_{Termistor} = V_{Disipacion} + V_{Temperatura\ ambiente}$$

En donde:

$V_{Termistor}$: Voltaje en el termistor.

$V_{Disipacion}$: Voltaje mediante convección forzada.

$V_{Temperatura\ ambiente}$: Voltaje a temperatura ambiente.

Empleando las mediciones del sensor de temperatura a fin de calcular la temperatura ambiente se tiene $V_{Temperatura\ ambiente} = f(V_{Sensor\ temperatura})$, sustituyendo en la ecuación anterior y acomodando los términos resulta en:

$$V_{Disipacion} = V_{Termistor} - f(V_{Sensor\ temperatura}) \quad (1.23)$$

Para obtener la función $f(V_{Sensor\ temperatura})$ se grafica $V_{Termistor}$ sin convección forzada y $V_{Sensor\ temperatura}$, ambas señales en función del número de muestras a medida que se varia la temperatura de 20° C a 40° C.

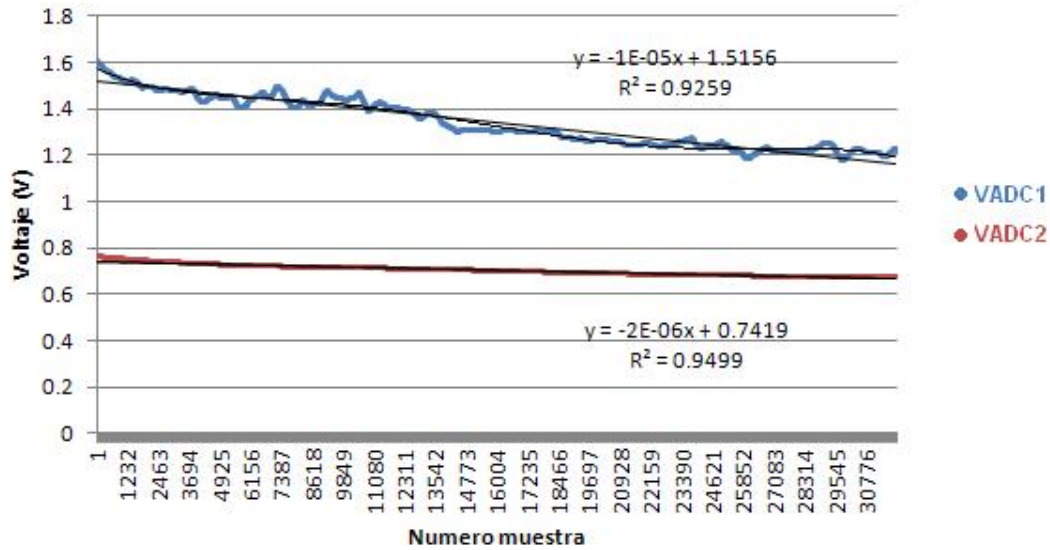


Figura 3.22. Disminución del Voltaje $V_{Termistor}$ y $V_{Sensor\ temperatura}$ en el tiempo a medida que se varía la temperatura de 20° a 40°C

A fin de obtener la relación de decaimiento del voltaje en el termistor en función de la temperatura se grafica $V_{Termistor}$ en función de $V_{Sensor\ temperatura}$.

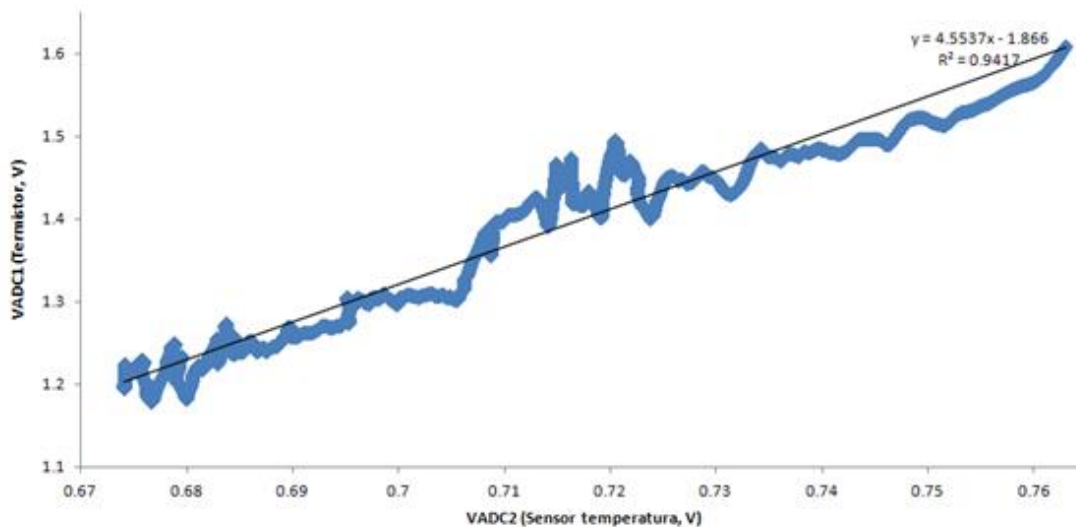


Figura 3.23. Voltaje en el termistor en función del voltaje en el sensor de temperatura

De la figura 3.23 se muestra una relación aproximadamente lineal cuya ecuación corresponde a:

$$f(V_{Sensor\ temperatura}) = 4.5537V_{Sensor\ temperatura} - 1.866 \quad (1.24)$$

Empleando la ecuación (1.23) es posible compensar el error en la medición de velocidad debido a la desviación en la temperatura mediante la ecuación (1.24) de la forma:

$$V_{Disipacion} = V_{Termistor} - (4.5537V_{Sensor\ temperatura} - 1.866)$$

Por último, midiendo la velocidad del viento a la vez que se tiene $V_{Disipacion}$ se encuentra la relación entre estas dos variables.

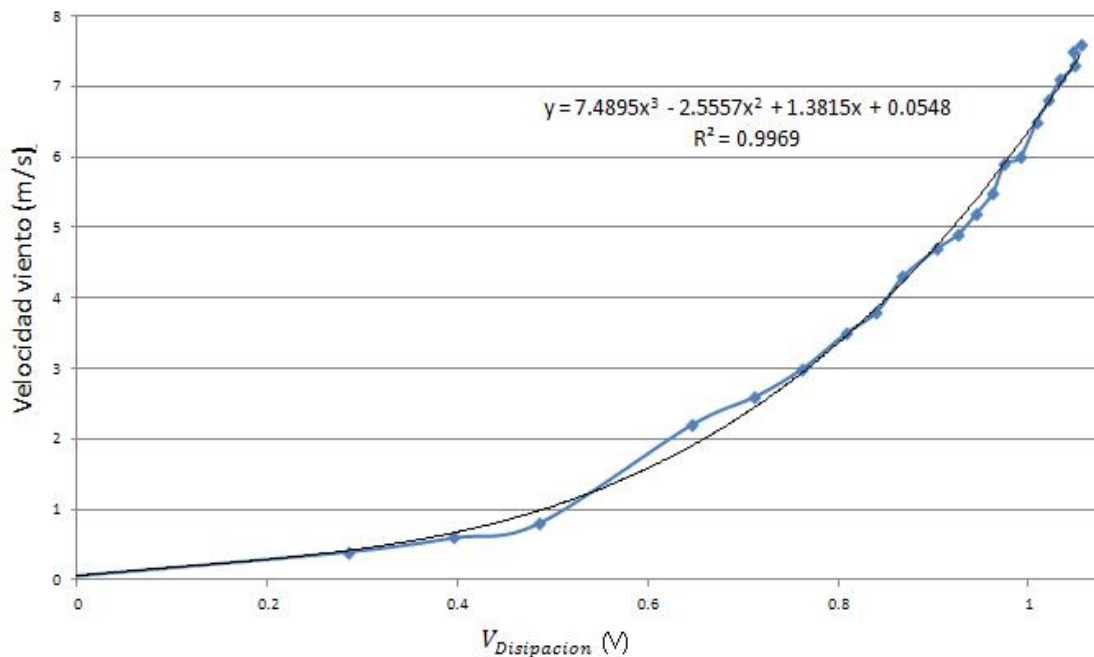


Figura 3.24. Curva velocidad del viento en función del voltaje de disipación en el termistor.

Resultando en la ecuación de velocidad (1.25).

$$V_{viento} = 7.4895V_{Disipacion}^3 - 2.5557V_{Disipacion}^2 + 1.3815V_{Disipacion} + 0.0548 \quad (1.25)$$

El diagrama mostrado en la figura 3.25 resume el procesamiento necesario sobre las señales adquiridas mediante el ADC1 y ADC2 a fin de poder calcular la velocidad del viento.

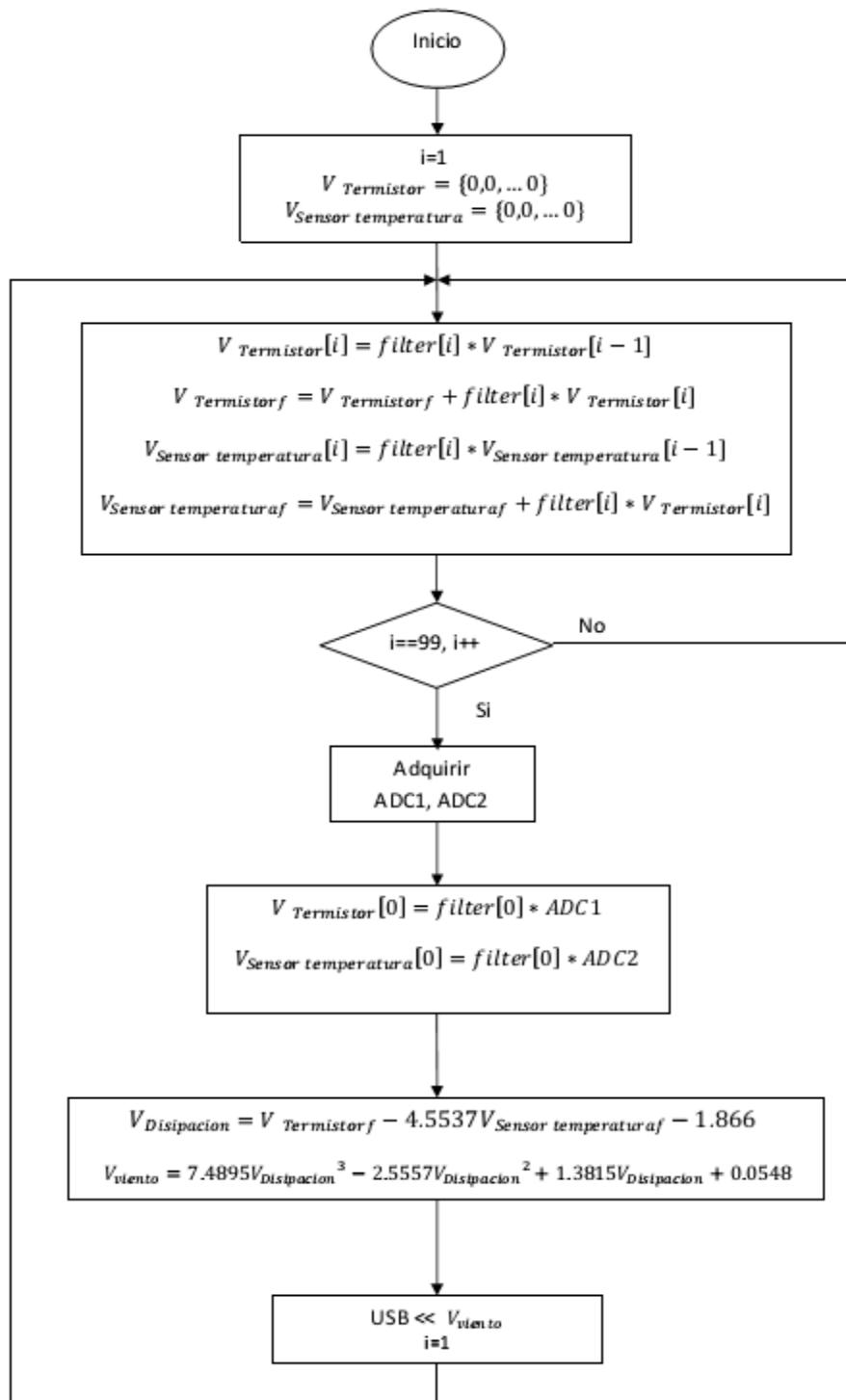


Figura 3.25. Diagrama flujo del algoritmo de medición de la velocidad del viento mediante termistor implementado en el microcontrolador STM32F4

3.3 Medición acústica

Para las mediciones acústicas se emplea dos micrófonos electret para computador marca Havit modelo HV-M80 como el mostrado en la figura 3.26, una tarjeta de sonido PCI marca Genius modelo SM-Live Value 5.1, y como herramienta de análisis de las señales acústicas el paquete de computación técnica Scilab 5.4.0.



Figura 3.26. Micrófono capacitivo electret Marca Havit HV-M80

3.3.1 Algoritmo función de masa de probabilidad.

Con la premisa de que el ruido inducido del viento corresponde a un proceso estocástico, se implementa un algoritmo en Scilab para estimar la distribución de probabilidad de los valores en una señal de n segundos. Se emplea como aproximación a la distribución un histograma de 2000 grupos, para valores comprendidos en el dominio $[-1:1]$. La descripción detallada del algoritmo empleado se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.27.b.

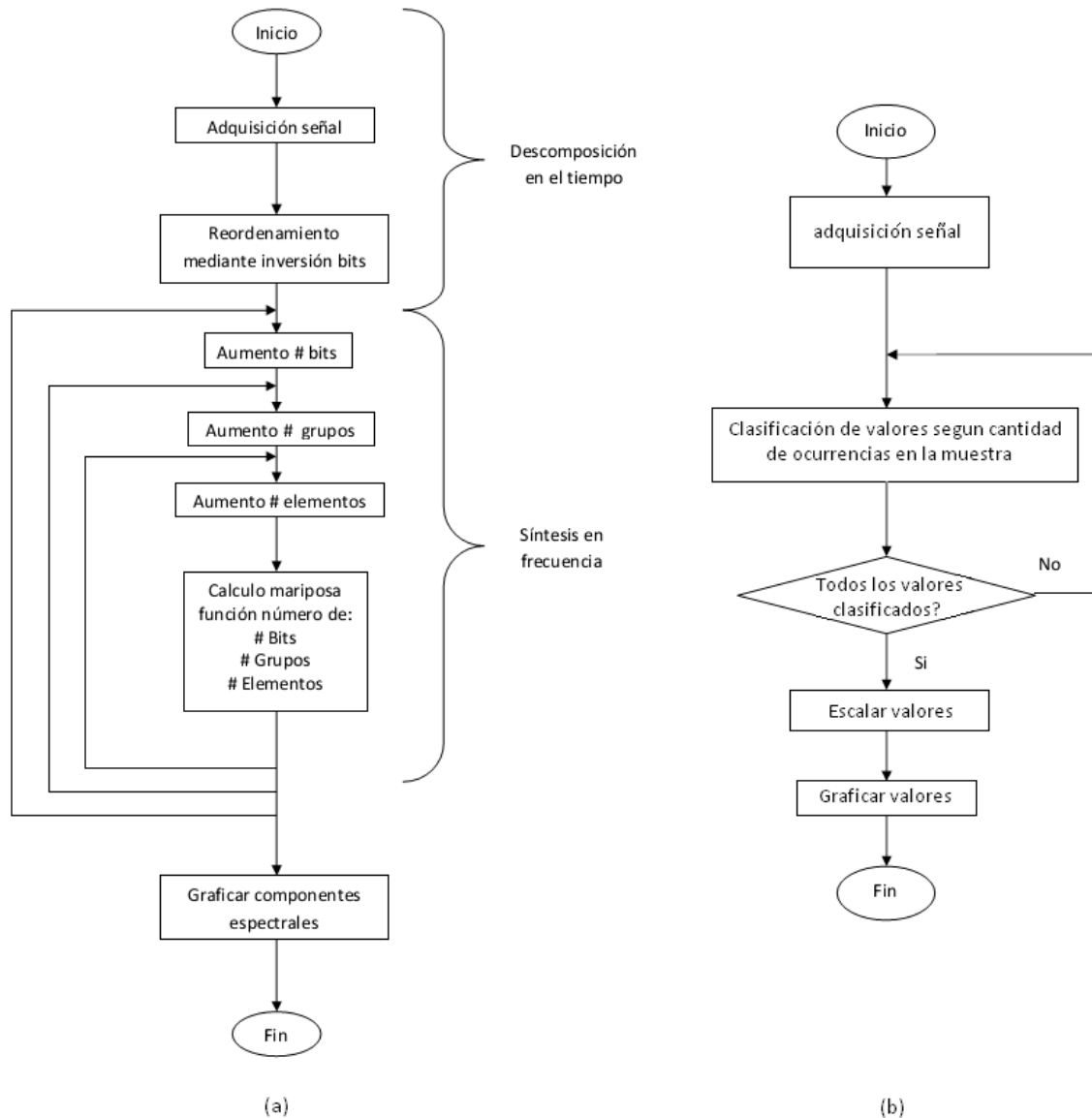


Figura 3.27. Algoritmos (a) Transformada Rápida de Fourier, (b) Estimación función de masa de probabilidad

3.3.2 Algoritmo espectro frecuencia.

Para analizar la composición espectral del ruido inducido del viento se emplea como método de análisis la transformada discreta de Fourier, implementada en Scilab mediante el algoritmo de Transformada Rápida de Fourier Radix 2 con decimación en tiempo. El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 3.27.a.

3.3.3 Algoritmos media móvil.

La media móvil es un filtro digital en el dominio del tiempo empleada como modelo lineal de estimación de la velocidad del viento a fin de reducir el ruido aleatorio. El algoritmo implementado en el estimador se muestra en el diagrama de la figura 3.28.

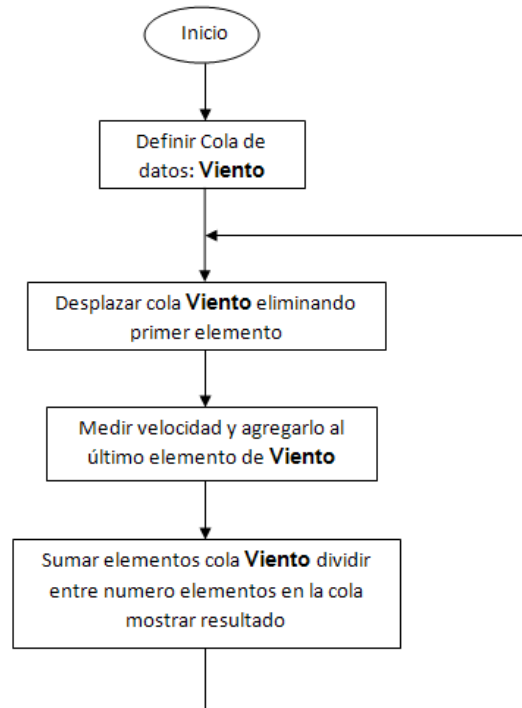


Figura 3.28. Filtro de media móvil empleado como estimador de la velocidad del viento

3.3.4 Algoritmos correlación cruzada.

Para determinar la correlación entre señales generadas por diferentes micrófonos, expuestos a las mismas condiciones de velocidad del viento se emplea el algoritmo de correlación mostrado en la figura 3.29.

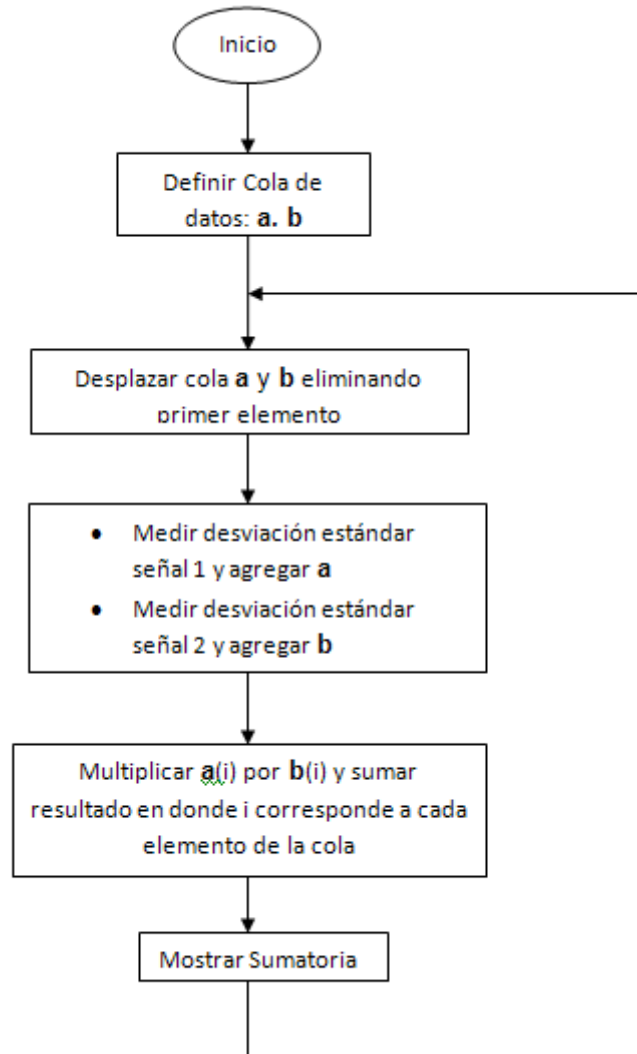


Figura 3.29. Algoritmo empleado para encontrar la correlación entre dos señales provenientes de diferentes micrófonos

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1 Distribución de probabilidad.

El primer análisis aplicado a la señal busca aproximar la función de masa de probabilidad del proceso subyacente, mediante el análisis de distribución de probabilidad de 60 segundos de muestreo del ruido inducido a diferentes velocidades del viento en el túnel. El conjunto de distribuciones se muestra en la figura 4.1.

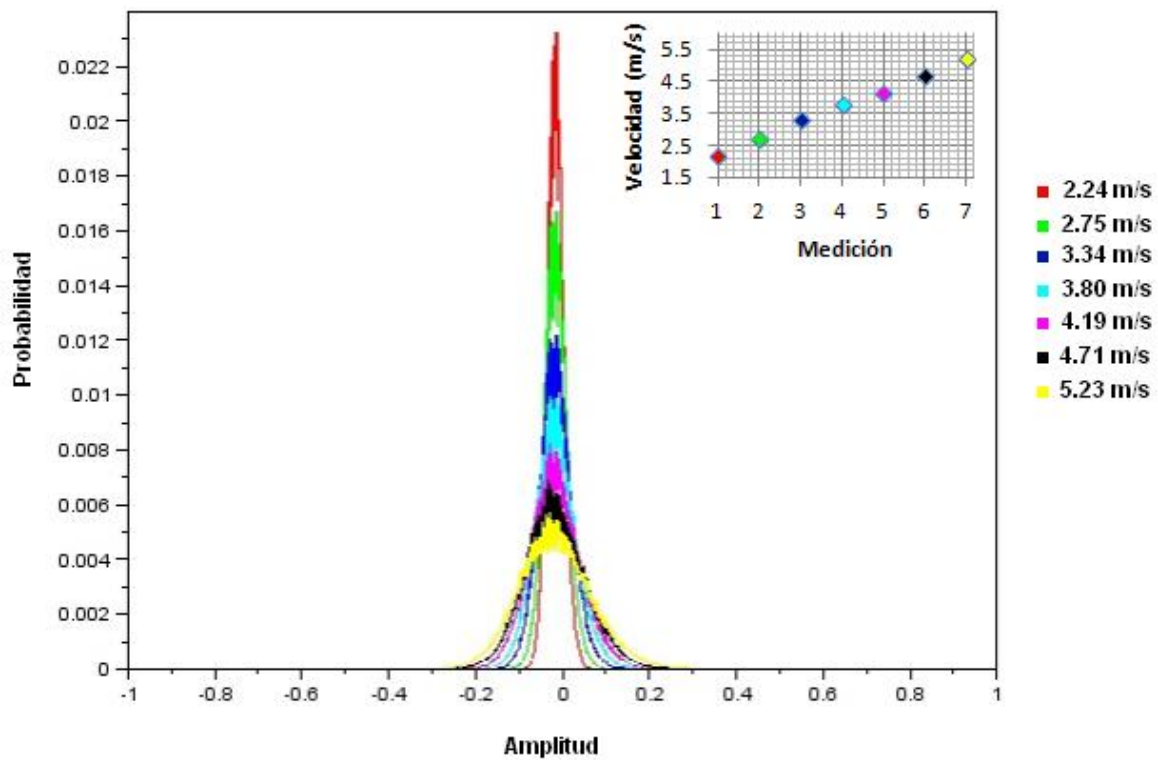


Figura 4.1. Distribuciones de probabilidad del ruido inducido a diferentes velocidades del viento.

La distribución de probabilidad para el ruido del viento puede ser considerada según la figura 4.1 una distribución normal o log-normal en donde su amplitud y ancho se encuentra determinada por la desviación estándar, mientras que el valor medio centra la curva. Empleando una aproximación normal, la figura 4.2 emplea la ecuación (4.1) a fin de aproximar las distribuciones obtenidas a velocidades de 2.24, 3.80 y 5.23 m/s.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

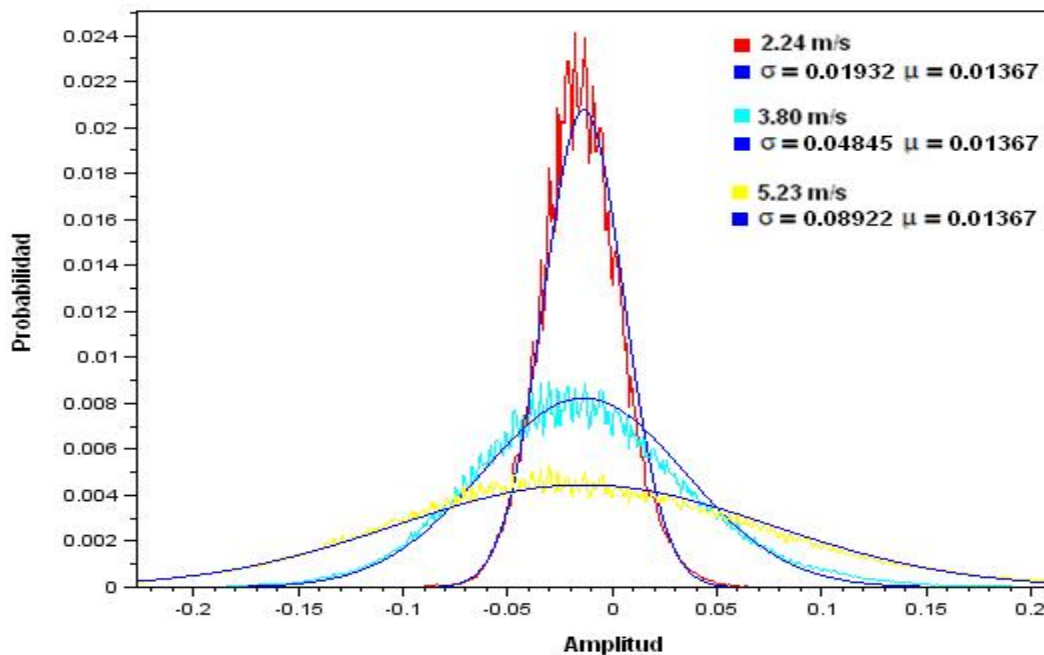


Figura 4.2. Distribuciones de probabilidad del ruido inducido del viento, con sus respectivas aproximaciones gaussianas.

En la figura 4.2 las curvas generadas mediante la función gaussiana emplean un valor medio μ diferente de cero, esto debido a que el hardware de sonido genera una desviación en el proceso de adquisición de la señal y es constante para cualquier velocidad del viento, sin embargo la desviación estándar de la señal está fuertemente correlacionada con la velocidad del viento y la curva puede ser aproximada con la simple variación de este valor. Las distribuciones normales como las mostradas en la figura 4.2 son comunes para variables físicas determinadas por subprocesos que a su vez son probabilísticos, cuya probabilidad se superpone para formar la distribución normal.

Estableciendo una relación:

$$v_{viento}(nt_{ad}) = f[\sigma(nt_{ad}) + \epsilon_{rr}] \quad (4.2)$$

En donde:

$v_{viento}(nt_{ad})$: Estimación de la velocidad del viento cada nt_{ad} segundos.

$\sigma(nt_{ad})$: Desviación estándar calculada en base a nt_{ad} segundos.

t_{ad} : Duración del tiempo de adquisición de la señal.

ϵ_{rr} : Error de cálculo σ con una muestra finita.

n : Numero de muestra $n=1, 2, 3 \dots \infty$.

Empleando la desviación estándar como estimador de la potencia de la señal, a diferentes valores de velocidad del viento a fin de encontrar la relación $f[\sigma(nt_{ad})]$ de la ecuación (4.2). Las curvas de la figura 4.3 muestran un comportamiento lineal de la desviación estándar del ruido inducido como variable dependiente de la velocidad del viento, cuya ecuación estática se puede indicar como:

$$v_{viento}(nt_{ad}) = 37.04\sigma(nt_{ad}) + 1.67 + \epsilon_{rr} \quad (4.3)$$

Teniéndose tres curvas a diferentes tiempos de adquisición t_{ad} , se observa él como la dispersión disminuye según la ley de fuerte de los grandes números, a medida que se utilizan mayor cantidad de valores, así el error en ϵ_{rr} queda en función inversa del intervalo t_{ad} .

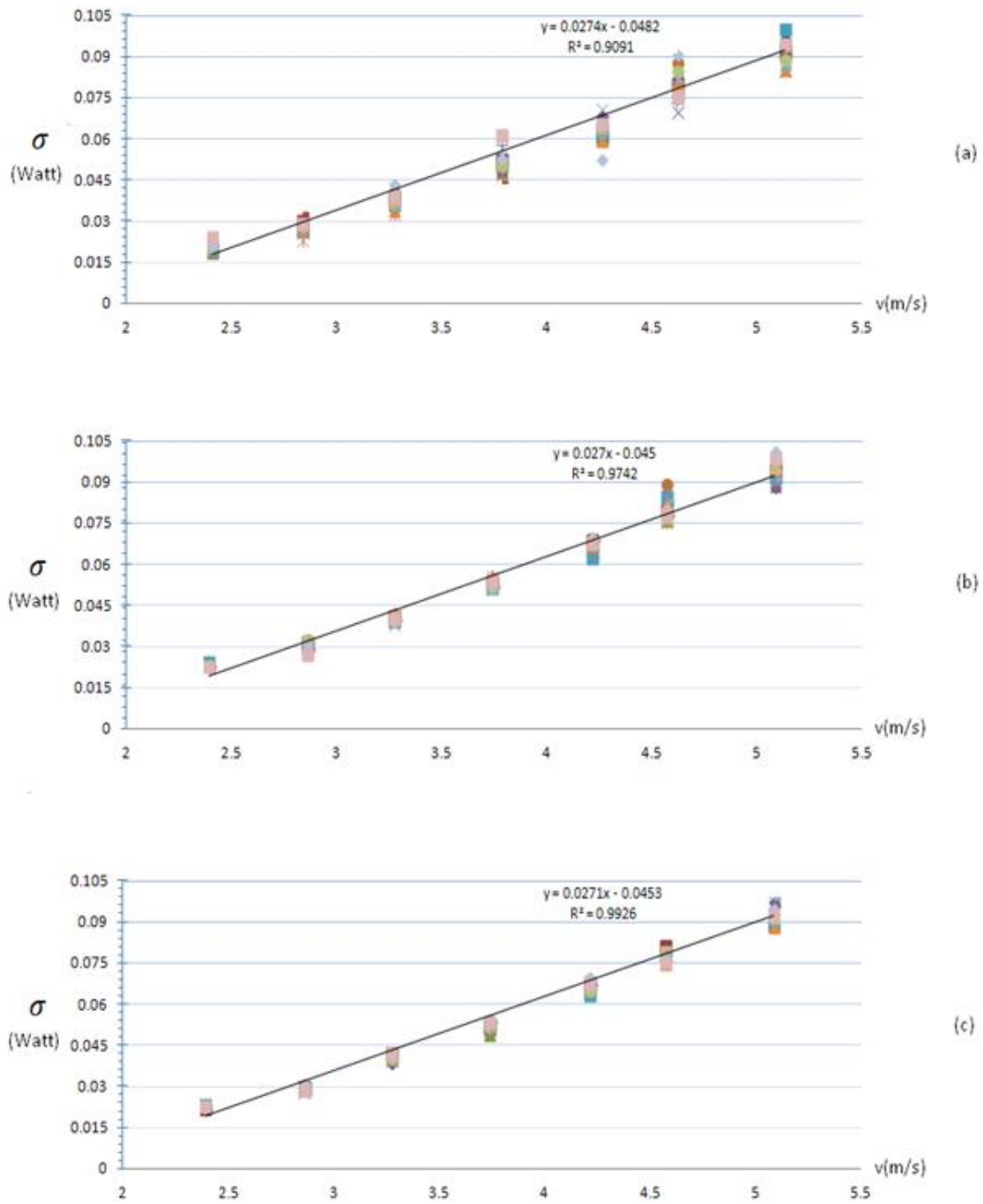


Figura 4.3. Transferencia desviación estándar en función de la velocidad del viento para intervalos de adquisición t_{ad} de (a) 0.5 segundos, (b) 2 segundos y (c) 5 segundos.

Tomando como velocidad de medición 4.26 m/s se mide el error típico ϵ_{rr} en función del intervalo de adquisición t_{ad} como lo muestra la figura 4.4.

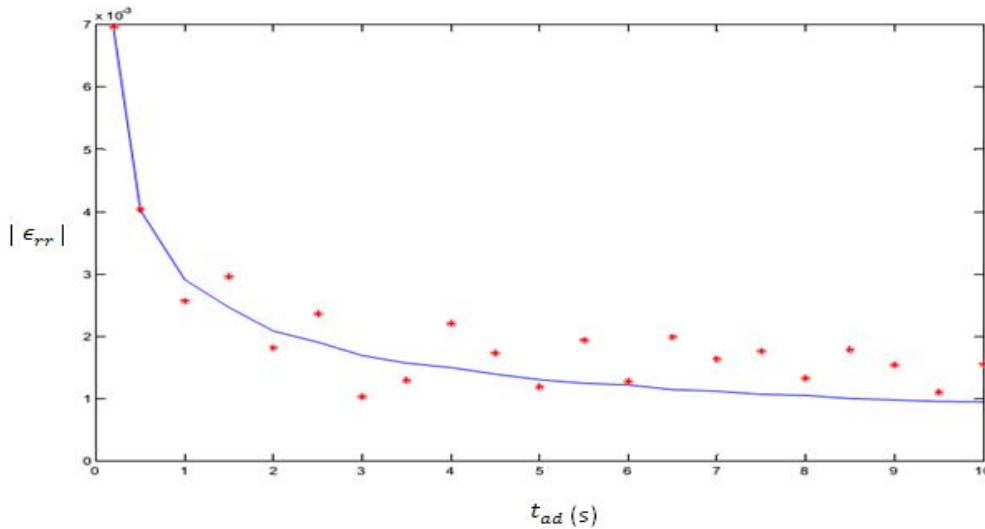


Figura 4.4. Error típico en la desviación estándar en función del tiempo de adquisición

Se observa en la curva de la figura 4.4 como el error aumenta considerablemente para intervalos de adquisición menores a 1 segundo, la curva converge a un valor determinado (Teóricamente cero) a medida que el intervalo de adquisición aumenta, sin embargo la tasa de cambio para el error tiende a ser muy pequeña para valores más allá de tres segundos. En la figura 4.5 se observa el aumento del error típico para un intervalo de tres segundos a medida que la velocidad del viento aumenta, sin embargo el error relativo con respecto a la magnitud de la desviación estándar se mantiene disperso cercano a un valor de 2.5 % sin importar la velocidad.

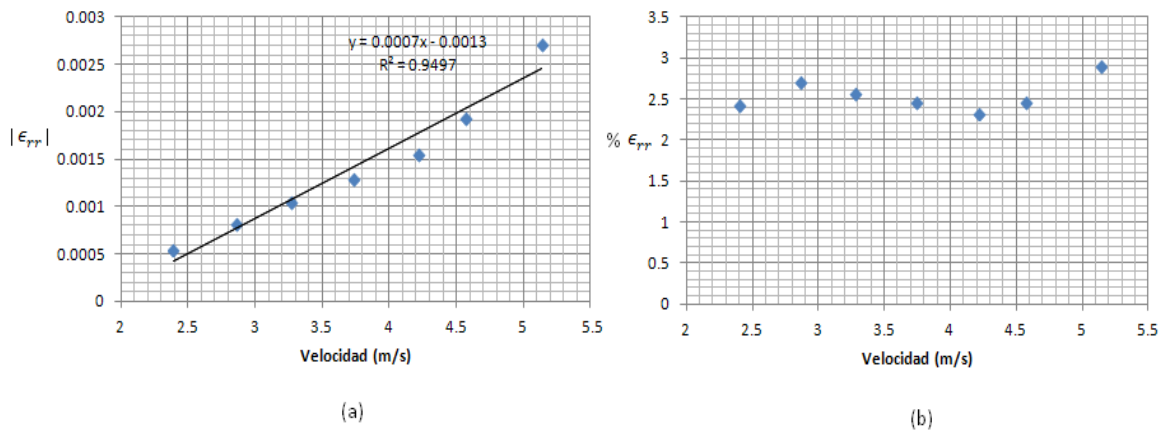


Figura 4.5. (a) Error típico de la desviación estándar en función de la velocidad del viento
(b) Error relativo con respecto a la magnitud de la desviación estándar.

4.2 Espectro en frecuencia

La Transformada Discreta de Fourier es una transformación lineal e invertible por tanto al ser aplicada a una variable aleatoria X tiene como resultado otra variable aleatoria Y . Así es de esperar que el espectro del ruido inducido del viento corresponda a una distribución aleatoria, sin embargo el análisis en frecuencia es importante a fin de identificar la ubicación de las componentes de frecuencia y el ancho de banda de la señal más que un patrón característico del espectro.

La figura 4.6 muestra el espectro de la señal a medida que se aumenta la velocidad del viento en el túnel.

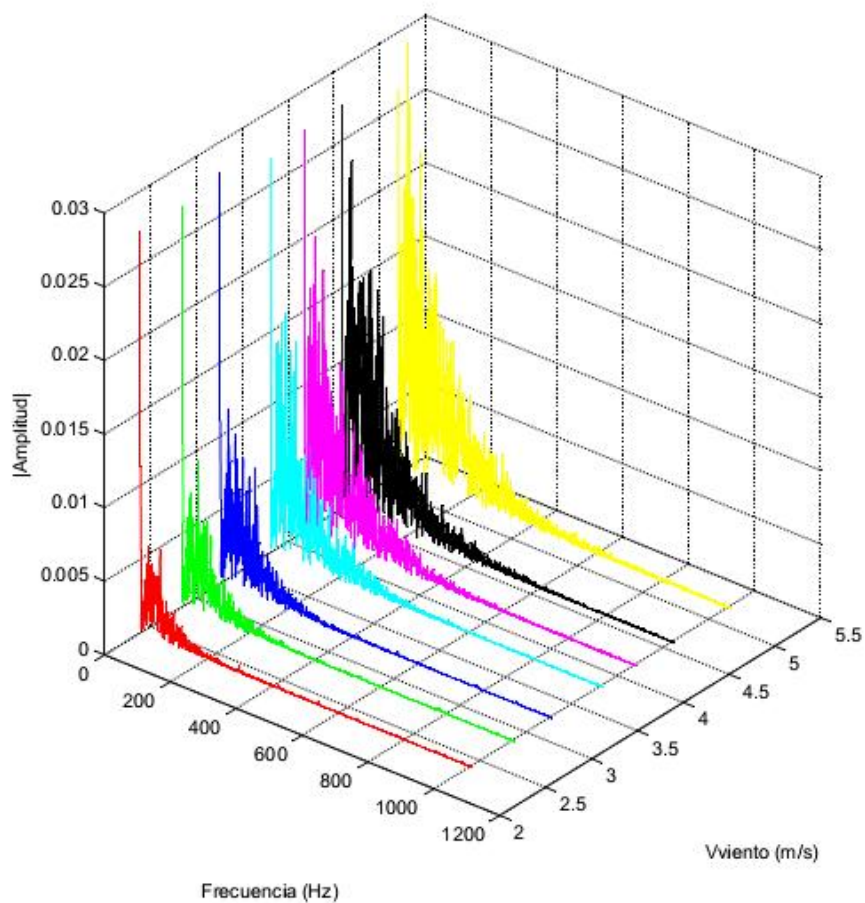


Figura 4.6. Espectro ruido inducido sobre el micrófono a diferentes Velocidades del viento

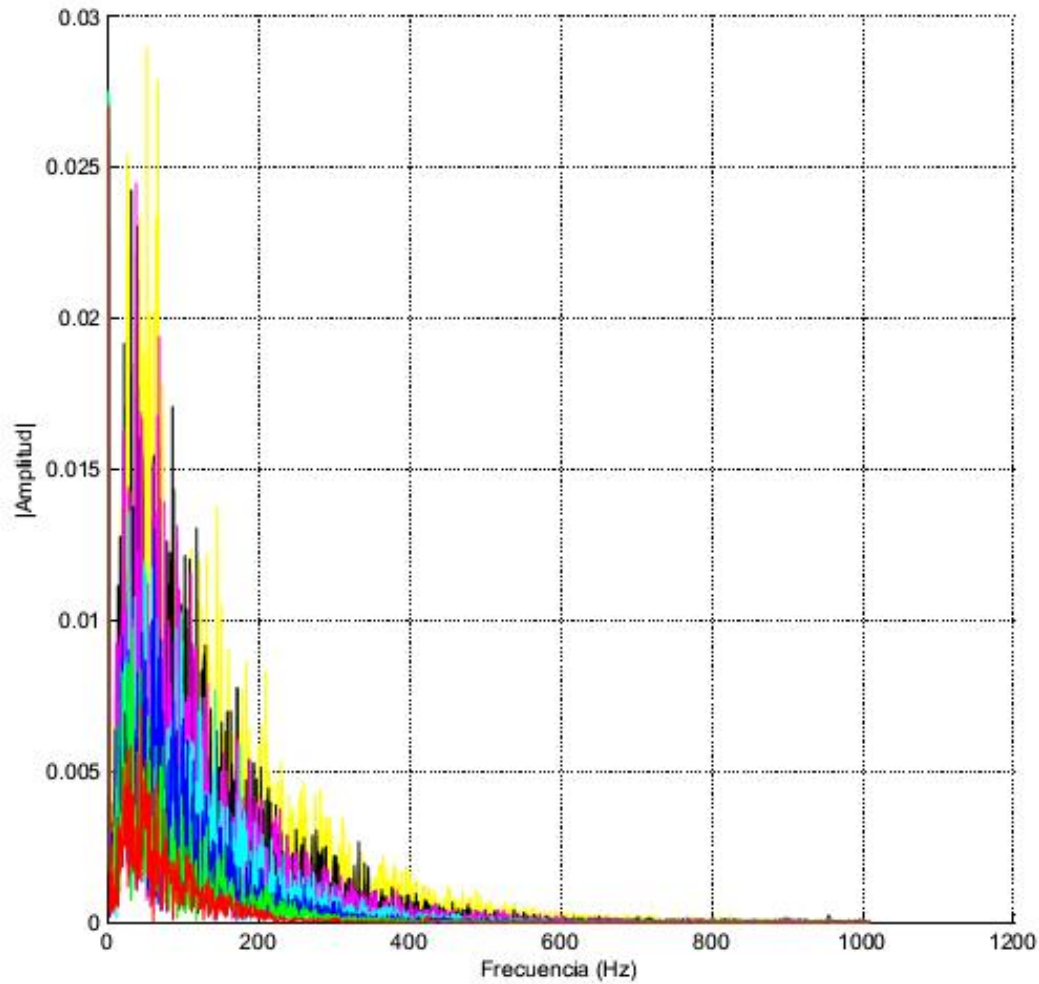


Figura 4.7. Vista en el plano Frecuencia-Amplitud de los espectros del ruido inducido a diferentes velocidades del viento.

En las figuras 4.6 y 4.7 se observa como las componentes espectrales de baja frecuencia constituyen principalmente la señal, además se observa que al aumentar la velocidad del viento corresponde a un aumento de las amplitudes de las componentes del espectro.

4.3 Presión sobre la membrana.

La presión que ejerce el fluido sobre el micrófono genera una deflexión cuasi-sostenida sobre la membrana, esta deflexión es debida a la fuerza de arrastre que experimenta la geometría sometida al fluido, así puede ser distinguida la deformación sobre la membrana de las oscilaciones ocasionadas por la turbulencia del sistema. A fin de medir esta deflexión se emplea el valor medio de la señal sin aplicar ningún filtro analógico o digital.

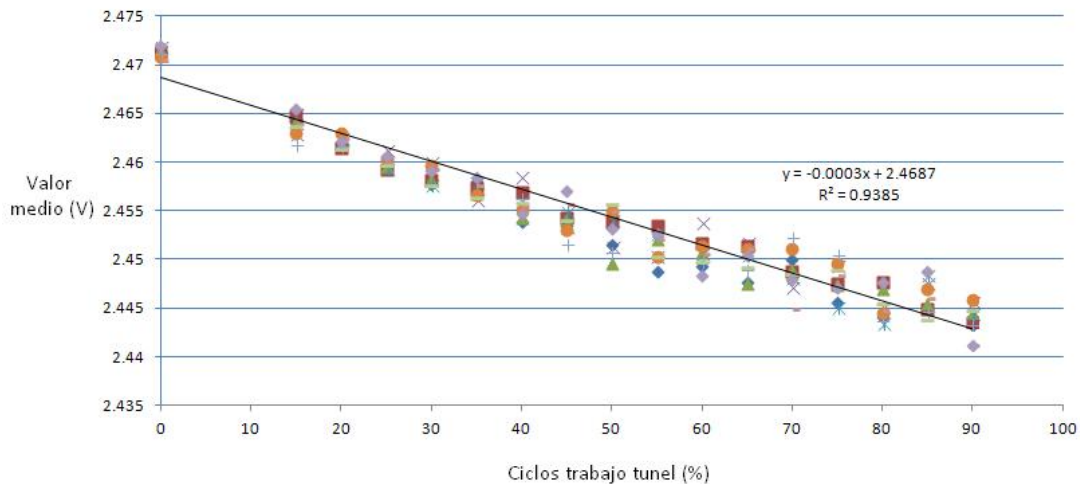


Figura 4.8. Valor medio de la señal durante cinco segundos a medida que se varia la velocidad del viento en el túnel

En la figura 4.8 se observa como el valor medio disminuye a medida que la velocidad del viento aumenta, esta comportamiento inverso es debido a la relación del micrófono de placas paralelas, en donde el potencial entre placas esta dado por el campo eléctrico (constante en un micrófono electret) por la distancia de separación entre placas, así a medida que la presión aumenta la distancia entre electrodos del capacitor disminuye y por tanto el potencia decrece proporcional.

El valor medio de la señal del ruido inducido conforma otro factor correlacionado con la velocidad del viento. Sin embargo a diferencia de la desviación estándar, la dispersión en los valores es mayor y el error típico no corresponde a una relación lineal (Figura 4.9).

* Diez mediciones distintas para cada valor de velocidad.

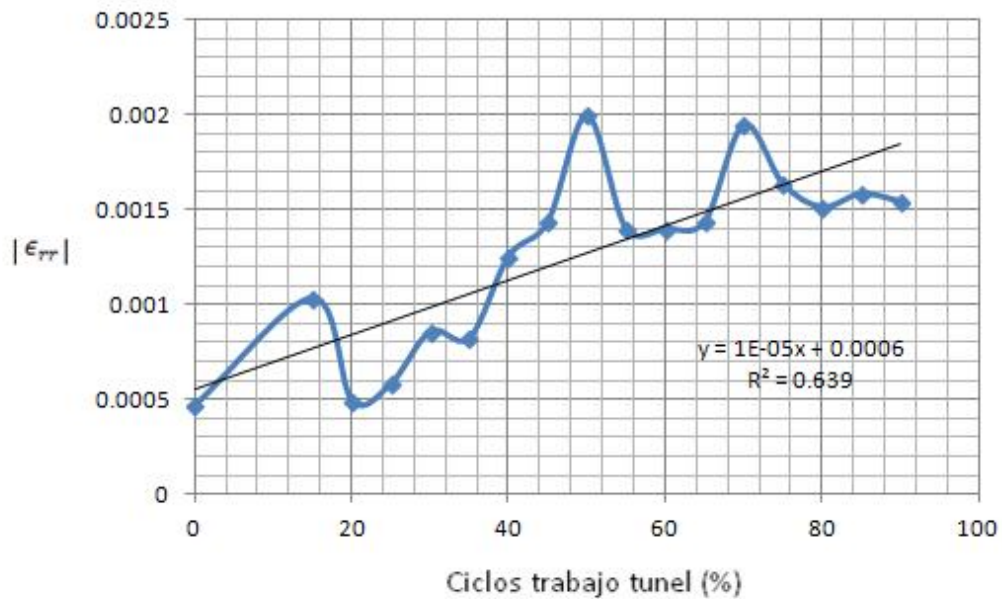


Figura 4.9. Error típico de la media en función de la velocidad del viento.

4.4 Media móvil

Empleando un modelo lineal para estimar la velocidad del viento a partir de la desviación estándar del ruido inducido, se emplea un filtro de media móvil debido a la excelente respuesta de filtrado en el dominio del tiempo. En la figura 4.4 se observa que para tiempos de adquisición y cálculo mayores a los tres segundos no se tiene una mejora significativa en el error, por tanto se escoge un tiempo total de 3 segundos de cálculo de la media móvil. Teniendo intervalos de adquisición de 0.2 a fin no limitar la respuesta dinámica del sistema a bajas frecuencias se tiene 15 intervalos de entrada para el filtro multiplicados por pesos igual a la unidad.

En la figura 4.10 se muestra el resultado de aplicar el filtro anteriormente descrito para medir 200 segundos de flujo mientras se varía la velocidad en el túnel de viento.

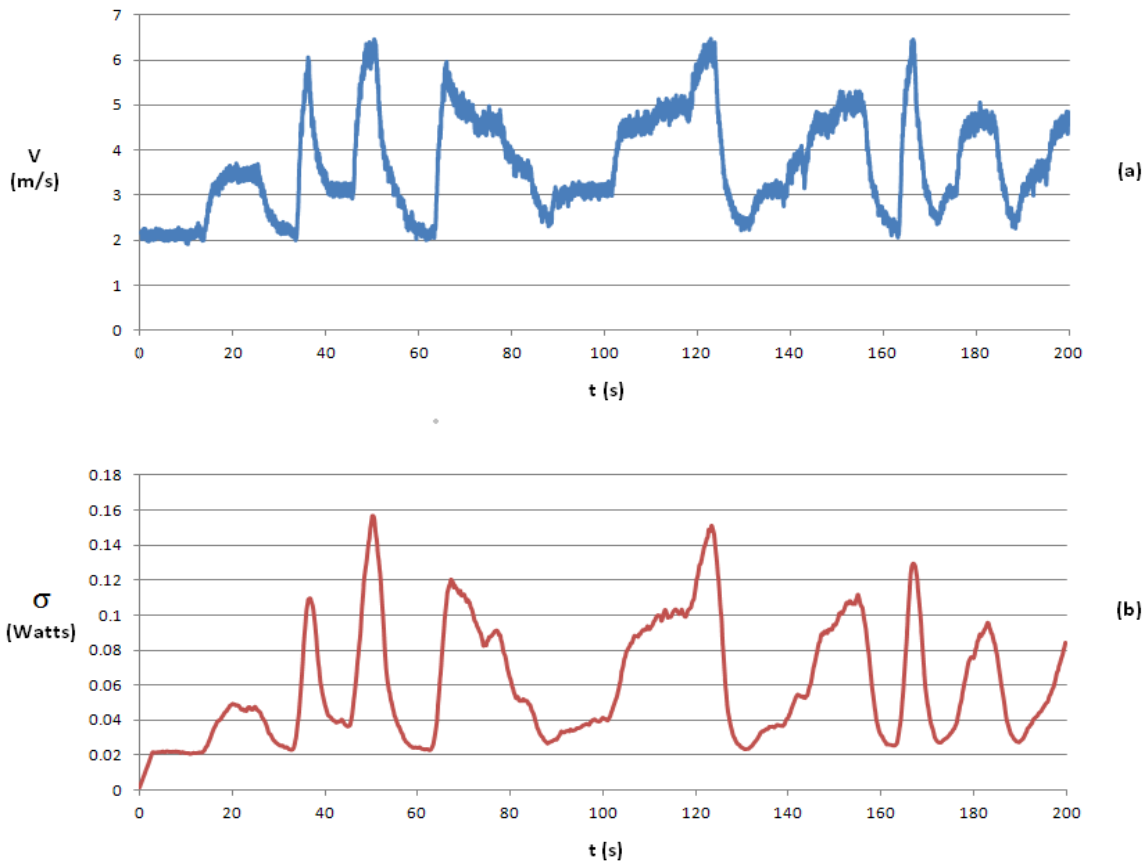


Figura 4.10. (a) Medición térmica de la velocidad del viento en el túnel durante 200 segundos (b) Medición de la desviación estándar de la señal acústica al aplicar un filtro de media móvil.

En la figura 4.10 (a) se muestra la medición de la velocidad del viento en el túnel empleando la punta térmica Dwyer 471. Se varía la velocidad del viento de forma aleatoria y se registra 200 segundos de medición a una tasa de muestreo de 54.7 valores por segundo, al mismo tiempo se registra la desviación estándar del ruido inducido del viento sobre el micrófono a intervalos de 5 valores por segundo, como medio de compensación del error se emplea un filtro lineal de media móvil (b). Es evidente la correlación directa de la velocidad del viento con respecto a la señal resultante del filtro que capta la tendencia de la velocidad en el túnel.

Al aplicar la ecuación (4.3) a la salida del filtro de media móvil se obtiene la grafica de la figura 4.11 en donde se muestra la velocidad del viento medida empleando filamento caliente y la estimación acústica calibrada con la ecuación.

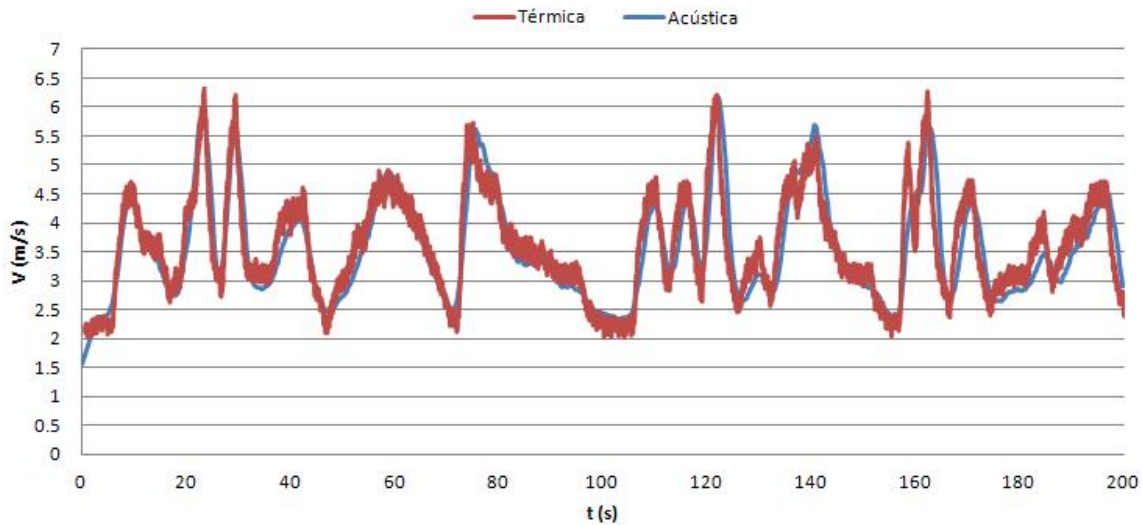


Figura 4.11. Medición velocidad del viento térmica y acústica

En la figura 4.11 se muestra como la desviación estándar presenta una buena estimación de la velocidad del viento al emplear sobre ésta un modelo lineal de media móvil con los pesos del filtro iguales a la unidad, para luego ser multiplicados por la ecuación de velocidad estática. El estimador presenta una buena respuesta dinámica permitiendo detectar variaciones en velocidad de hasta 3.5m/s en intervalos menores a los 3 segundos. La precisión del método se evalúa mediante el diagrama de dispersión mostrado en la figura 4.12 en donde el coeficiente de correlación entre los valores verdaderos y estimados corresponde a 0.9343.

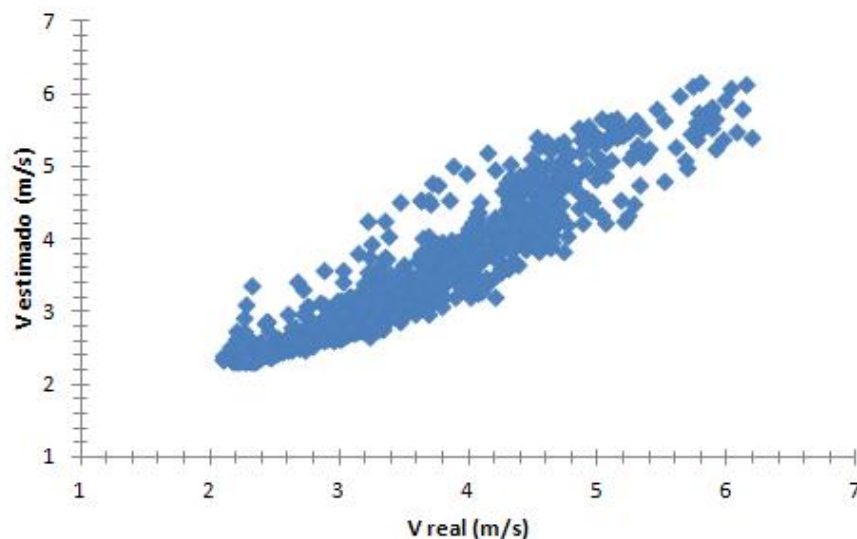


Figura 4.12. Relación entre valor real de la velocidad del viento y el valor estimado mediante media móvil.

La figura 4.13 corresponde al porcentaje de error existente para una muestra de mil valores, se observa como la mayoría de las estimaciones presentan errores por debajo del 20% con un error medio de 6.93%.

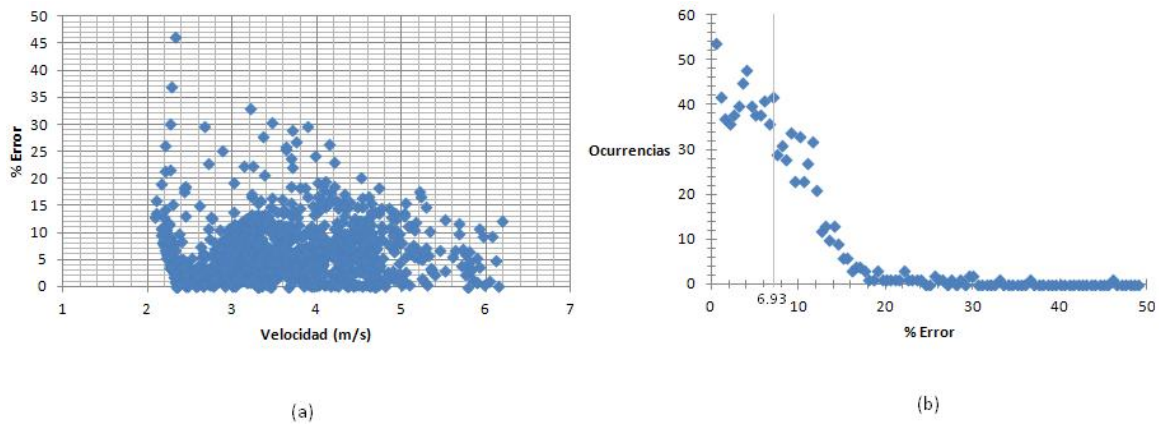


Figura 4.13. Porcentaje de error en función de la velocidad para un conjunto de mil valores.

4.5 Directividad.

Mediante la magnitud de la velocidad del viento en función de la orientación del micrófono al flujo se puede medir la directividad del valor estimado. La figura 4.14 (a) muestra la orientación inicial del micrófono en el túnel, en donde a los 90° se tiene la membrana perpendicular a la dirección del viento. Se varía la dirección del micrófono en pasos de 20° desde 10° hasta 170° . La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos.

Tabla 4.1. Velocidad del viento estimada en función de la orientación del micrófono

Angulo ($^\circ$)	Velocidad (m/s)
10	2.32066
30	2.38171
50	2.58706
70	2.73913
90	2.73099
110	2.55783
130	2.48716
150	2.3547
170	2.3769

La figura 4.14 (b) muestra los resultados de la tabla 4.1.

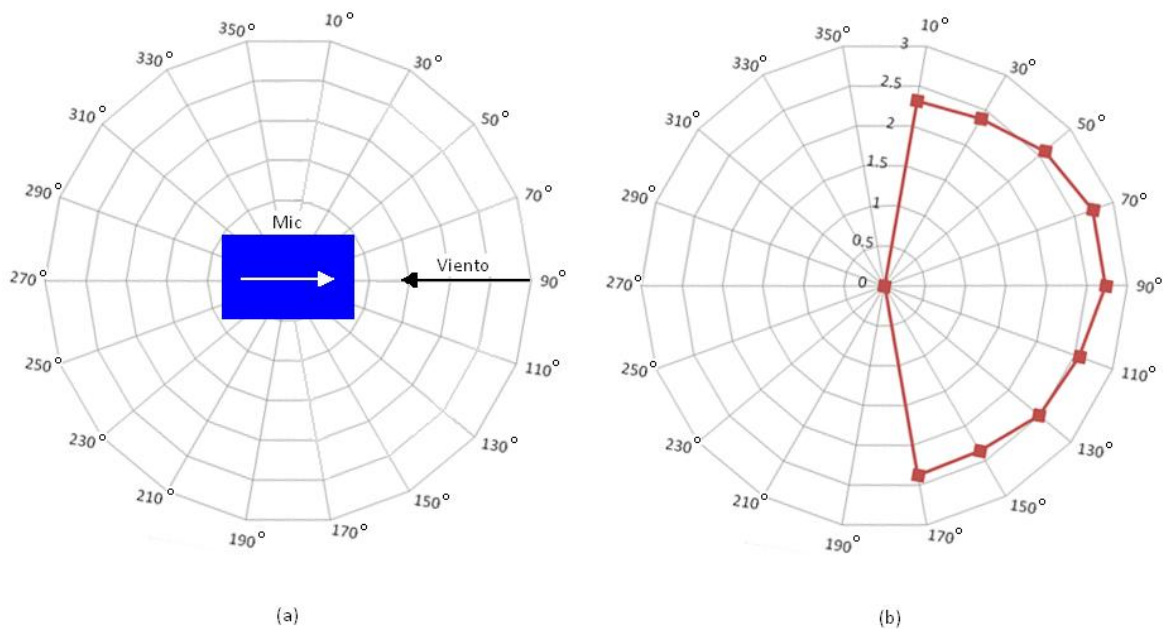


Figura 4.14. Sensibilidad de la medición en función de la dirección del viento (a) Orientación del micrófono (b) Velocidad en función del ángulo de orientación.

La figura 4.14 (b) muestra que la magnitud de la estimación es máxima cuando el micrófono confronta el fluido y disminuye a medida que el micrófono se orienta perpendicular al fluido (Membrana paralela al flujo). La mayor variación en la velocidad se presenta entre el cambio de orientación de los 30° a los 50° correspondiente a un 7.49% del valor máximo obtenido a los 90°. En la figura 4.13 (b) se observa que el error medio de la estimación se encuentra en 6.93% por tanto una variación de velocidad de 7.49% no es significativa para determinar la dirección del viento puesto que se encuentra en el rango de error de la estimación. El que el micrófono electret sea omnidireccional presenta una desventaja a la hora de determinar la dirección del viento según el ruido inducido sobre el micrófono.

4.7 Correlación cruzada.

Bajo el hardware de la tarjeta STM32F4 Discovery, se realizó mediciones sin el túnel de viento sobre un flujo turbulento y utilizando dos micrófonos, sobre cuyas señales se calcula la desviación estándar a intervalos de un cuarto de segundo, se aplicó un algoritmo de correlación sobre ambas desviaciones a fin de encontrar la señal resultante de cros correlación y el coeficiente de correlación para una muestra de 1285 valores.

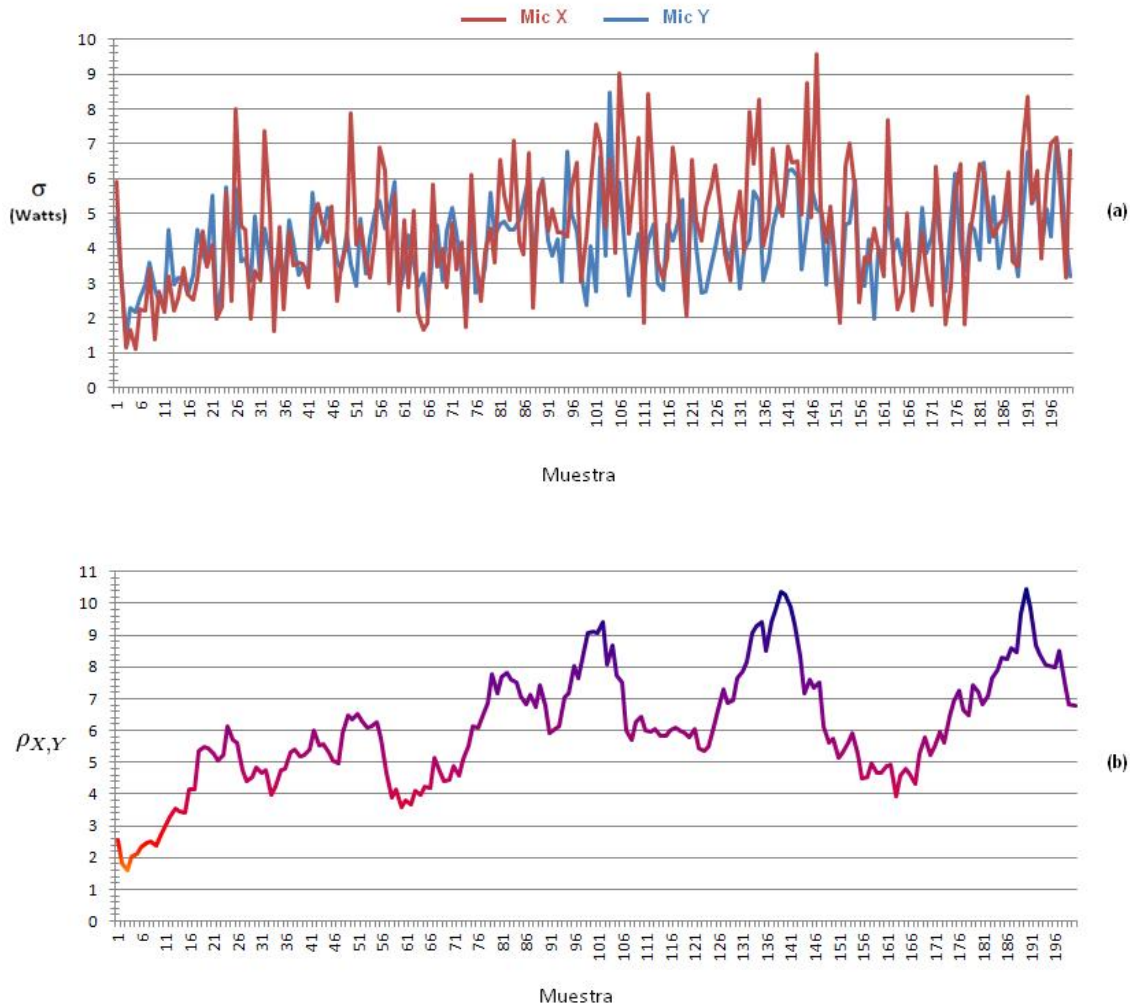


Figura 4.15. (a) Primeros 200 valores de desviación estándar para ambos micrófonos a intervalos de 0.25s (b) Señal de cros correlación obtenida del las señales X y Y mostradas en (a).

El coeficiente de correlación de Pearson para la muestra total de 1285 valores es de 0.5484

En la figura 4.15 (b) se muestra la señal resultante de la correlación de las desviaciones estándares en ambos micrófonos. Un problema resultante de la medición de la velocidad del viento empleando micrófonos consiste en la determinación de la velocidad del viento cuando el fluido no se puede considerar laminar, en este caso la turbulencia del fluido presenta una fuente de error más, empleando la correlación de señales de distintos micrófonos es posible disminuir errores locales ocasionados por la turbulencia del fluido y obtener la tendencia general.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- 1) El ruido inducido del viento sobre micrófonos capacitivos presenta una distribución de probabilidad gaussiana, definida por un valor medio y desviación estándar correlacionadas con la velocidad del viento.
- 2) La desviación estándar es una mejor fuente de estimación de la velocidad del viento, debido a su menor error típico dado una muestra finita.
- 3) La desviación estándar presenta una relación lineal con respecto a la velocidad del viento para velocidades inferiores a los 5.5m/s.
- 4) El intervalo de adquisición adecuado para la estimación de la velocidad del viento corresponde a tres segundos a una frecuencia de muestreo de 44 kHz.
- 5) El error típico presenta un comportamiento proporcional inverso, en donde para valores menores de tres segundos el error aumenta de forma exponencial, y para valores mayores a tres segundos la disminución en el error no es significativa.
- 6) Para el error típico se tiene un aumento a medida que aumenta la velocidad del viento, sin embargo en proporción a la magnitud de la desviación estándar se tiene un comportamiento casi constante de 2.5% de error.
- 7) Las componentes espectrales que forman el ruido inducido por el viento se encuentran en bajas frecuencias sin que se distinga ningún patrón espectral característico, cuya magnitud aumenta a medida que la velocidad del viento aumenta.
- 8) Un modelo lineal de media móvil sobre la desviación es un buen estimador de la velocidad del viento presentando tan solo un error medio de 6.93%.
- 9) La sensibilidad del micrófono con respecto a la dirección del viento se encuentra muy cercana al error del modelo lineal, por lo que no se puede considerar el micrófono capacitivo como herramienta para un buen estimador de la dirección del viento.
- 10) Las desviaciones estándares medidas en diferentes micrófonos expuestos al mismo fluido presentan correlación cruzada que puede ser empleada para disminuir el error ocasionado por turbulencia.

5.2 Recomendaciones.

Se recomienda:

- 1) Emplear un túnel de viento de mayor potencia capaz de alcanzar velocidades superiores a las 20 m/s.
- 2) Utilizar secciones de pruebas capaces de introducir modelos de turbulencia.
- 3) Considerar los micrófonos capacitivos de presión diferencial como transductores, a fin de mejorar la sensibilidad con respecto a la dirección.

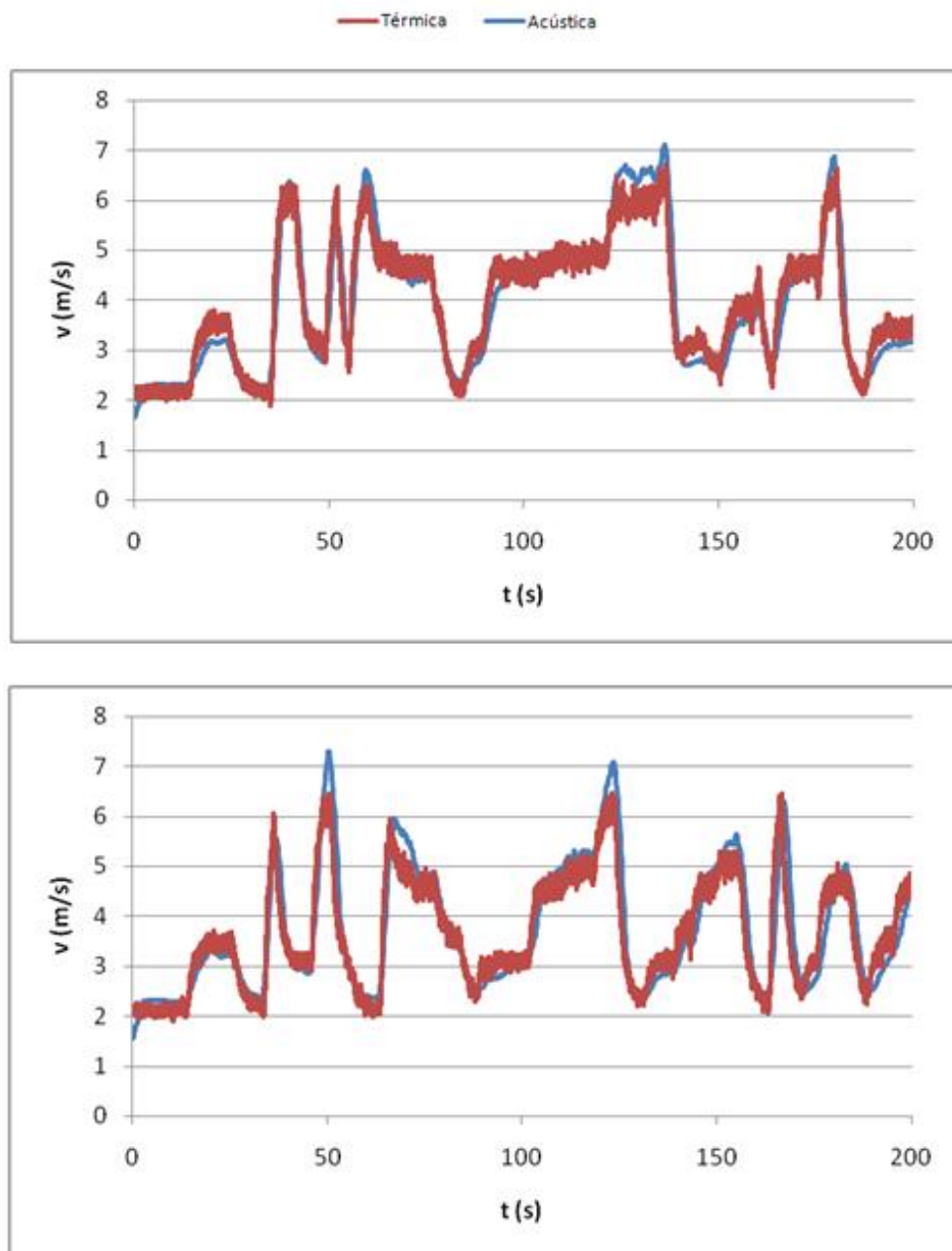
Bibliografía

- [1] Monge R. (2007) Los bosques de Costa Rica. Centro de investigación integración bosque industria ITCR. URL: <http://www.asvocr.org/pdfs/bosquedecostarica.pdf>.
- [2] Zúñiga M. (2011) Modulo de reducción de dimensiones espectrales en un sistema de reconocimiento de patrones acústicos de motosierras y disparos por medio de una implementación en FPGA. ITCR. URL:<http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/xmlui/bits-tream/handle/2238/2589/Tesis.pdf?sequence=1>.
- [3] Chris Bahr, Jian Li, and Louis Cattafesta. *Aeroacoustic Measurements in Open-jet Wind Tunnels – An Evaluation of Methods Applied to Trailing Edge Noise*. 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2011.
- [4] Takeshi Ito, Hiroki Ura, Yuzuru Yokokawa. *Aeroacoustic Noise measurements in aerodynamic low-speed wind tunnels*. 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2008.
- [5] Taylor B. Spalt. *Background Noise Reduction in Wind Tunnels using Adaptive Noise Cancellation and Cepstral Echo Removal Techniques for Microphone Array Application*. Master of Science Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Hampton, Virginia. June 29, 2010.
- [6] Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura and H. Minamihara. *An Experimental Study on the Measurement of Objective Sound under Contamination of Wind Noise*. International Journal of Acoustics and Vibration, Volume 2. 147-152, 1997.
- [7] R. G. Zhang and S. Kanapathipillai. *A study of wind induced noise in microphones*. Australian Acoustical Society. Conference: Acoustic and sustainability. Victoria, Australia, 2008.
- [8] Barry D. Van Veen and Kevin M. Buckley. *Beamforming: A versatile approach to spatial filtering*. IEEE ASSP Magazine **5**. 4-24. April, 1988.
- [9] Noboru Nakasako, Koichi Sakamoto, Itoshi Itoh and Yoshiaki Takakuwa. *A practical countermeasure of wind induced noise in environmental noise measurement base on linear and/or non linear model using wind speed information*. Memoir of the school of B.O.S.T. of Kinki University No 16. 19-28. Wakayama, Japan, 2005.

- [10] Pijush K. Kundu and Ira M. Cohen. *Fluid Mechanics Fourth edition*. Elsevier. 296-297. 2010.
- [11] Comsol Multiphysics. *Comsol Multiphysics User Guide: Fluid flow branch* Comsol 4.2a. 2011.
- [12] Juan Gabriel M. Gapper. *Dimensionamiento y construcción de túneles de viento de baja velocidad*. UCR Ingeniería 16 (2): 45-54. San José, Costa Rica. 2006.
- [13] R. D. Metha and P. Bradshaw. *Design rules for small low speed wind tunnels*. The aeronautical journal of the royal aeronautical society. November, 1979.
- [14] Cameron Tropea, Alexander L. Yarin and John F. Foss. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer. 229-230. Berlin Heidelberg 2007.
- [15] Qality Thermistor Inc. *NTC Thermistor design guide for discrete components and probes*. Boise, Idaho. 2007.
- [16] Comsol Multiphysics. *Axisymmetric Condenser Microphone with Electrical Lumping*. Comsol 4.2a. 2011.
- [17] Steven W. Smith. *Digital signal processing a practical guide for engineers and Scientist*. Elsevier. 277-280. U.S.A. 2003.
- [18] Glenn Research Center NASA. *TunnelSim-OpenReturn description software*. October, 2012. URL <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/TunnelSim/index.htm>.

Apéndice

A Media móvil



A.1. Medición velocidad del viento térmica y acústica.

B Algoritmos

```

recorderID = pa_defaultinputdeviceid();
seg=1;
nbSamples =seg.*44100;
sampleRate = 44100;
nbChannels = 1;
sort=zeros(1,2000);
colores=['r'-'b'-'g'-'c'-'m'-'y'-'k'];
for j=1:7

datas = pa_recordwav(nbSamples, sampleRate, recorderID, nbChannels);
disp(sum(datas)/nbSamples);
datas=datas*1000;
tau = 1./ sampleRate;
t = (0:nbSamples-1).*tau;
rounddatas=round(datas);

for i=1:nbSamples
....sort(1000+rounddatas(i))=sort(1000+rounddatas(i))+1;
end

sort=sort/nbSamples;

scf(0);
plot(-1:0.001:0.999,sort,colores(j));
end
clear;

```

B.1. Algoritmo masa de probabilidad

```

recorderID = pa_defaultinputdeviceid();
seg=0.2;
nbSamples =seg * 44100;
sampleRate = 44100;
nbChannels = 1;
insign = pa_recordwav(nbSamples, sampleRate, recorderID, nbChannels)';

disp('adq-ok');

N=length(insign);

Lbits=nextpow2(N);
fullinsign=zeros(1,2^Lbits);

fullinsign(1:N)=insign;
newsplitindex=[];
outsign=[];
FFTo=[];
counter=zeros(1,Lbits);

for oldindex=0:2^Lbits-1
    --
    --- oldstindex=dec2bin(oldindex,Lbits);
    --- oldsplitindex=strsplit(oldstindex)
    --- for i=0:Lbits-1
    --- --- newsplitindex(i+1)=oldsplitindex(Lbits-i);
    --- end
    --- nexstindex=strcat(newsplitindex);
    --- newindex=bin2dec(nexstindex);
    --- outsign(oldindex+1)=fullinsign(newindex+1);

end

WN=complex(cos(-2*pi/2^Lbits),sin(-2*pi/2^Lbits))

for i=1:Lbits
    -----
    --- for grupos=0:2^i:2^Lbits-2^i
    -----
    --- --- for elementos=0:1:2^(i-1)-1
    -----
    --- --- --- WNG0=outsign(2^(i-1)+grupos+elementos+1) * WN^((elementos)*(2^(Lbits-i)));
    --- --- --- container1= outsign(grupos+elementos+1) + WNG0;
    --- --- --- container2= outsign(grupos+elementos+1) - WNG0;
    --- --- ---
    --- --- --- outsign(grupos+elementos+1)=container1;
    --- --- --- outsign(2^(i-1)+grupos+elementos+1)=container2;
    --- --- ---
    --- --- end
    --- ---
    --- end
end

scf(0);
plot(abs(outsign),'k');
scf(1);
plot(-atan(-real(outsign)/imag(outsign)),'k-');

```

B.2. Transformada Rápida de Fourier

```

for (i=0; i<=99; i++)
{
    if (i==50)
    {
        filter[i]=2*pi*10/1000;
    }
    else
    {
        filter[i]=sin(2*pi*10/1000*(i-50))/(i-50)*(0.4-0.5*cos(2*pi*i/100)+0.08*cos(4*pi*i/100));
    }
}

while (1)
{
    ADC1chanel11voltage=(ADCTripleConvertedValue[0]>>4)*3.3/0xFFF;
    ADC2chanel12voltage=(ADCTripleConvertedValue[1]>>4)*3.3/0xFFF;
    vdisip=ADC1chanel11voltage-(4.5537*ADC2chanel12voltage-1.866);

    for (i=0; i<=99; i++)
    {
        sign_out=sign_out+sign_in[i]*filter[i];
    }

    for (i=99; i>=1; i--)
    {
        sign_in[i]=sign_in[i-1];
    }

    sign_in[0]=vdisip;
    sign_out=sign_out/2.2;
    viento=7.4895*sign_out*sign_out*sign_out-2.5557*sign_out*sign_out+1.3815*sign_out+0.0548;
    viento=1.2965*viento;
    sign_out=0;

    if (cont==50)
    {
        printf("viento= %2.4lf m/s \n", viento);
        cont=0;
    }
    else
    {
        cont++;
    }
}

```

B.3. Filtro digital pasa baja de función sinc con ventana de blackman C++ Atollic.

```

disp('star');
areRMS=[0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0];
total=0;
seg=0.2;
nbSamples =seg.*44100;
sampleRate =44100;
nbChannels =1;
recorderID =pa_defaultinputdeviceid();
----for i=1:50

----- SignIN = pa_recordwav(nbSamples, sampleRate, recorderID, nbChannels)';
-----
----- countvalues=length(SignIN);
----- powvalues=power(SignIN,2);
----- sumvalues=sum(powvalues);
----- rmsvalue=sqrt(sumvalues/countvalues);
-----
-----
----- for k=15:-1:2
----- areRMS(k)=areRMS(k-1);
----- end
----- areRMS(1)=rmsvalue;
-----
----- sumrms=sum(areRMS);
----- medrms=sumrms/15;
-----
----- resua=sprintf('%u-%3.5f',i, medrms);
----- disp(resua);
----- total=total+medrms;
----end
-----
----resua=sprintf('-%3.5f',i, total/50);|
----disp(resua);

```

B.4. Algoritmo Media Móvil