



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**“CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DEL TÚNEL DE VIENTO DE LA
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO”**

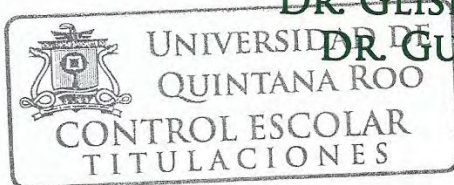
**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO**

CARRERA
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
MIGUEL ÁNGEL MENDOZA MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

ASESORES
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
DR. FERNANDO FLORES MURRIETA
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2019



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO
"Caracterización del flujo del Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo"


ELABORADO POR
Miguel Ángel Mendoza Martínez

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

Ingeniero en Sistemas de Energía

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


Dr. José Hernández Rodríguez
NOMBRE DEL DIRECTOR

ASESOR:


Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar
NOMBRE DE LA ASESOR


ASESOR:


Dr. Fernando Flores Murrieta
NOMBRE DE LA ASESOR

ASESOR:


Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool
NOMBRE DEL ASESOR

ASESOR:


Dr. Guillermo Becerra Núñez
NOMBRE DEL ASESOR



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2019

Contenido

Objetivos.....	1
Objetivo General	1
Objetivos Particulares.....	1
Introducción	2
Capítulo I	4
Antecedentes.....	4
Túnel de Viento y Función	4
Historia del Túnel de Viento.....	4
Túnel de Viento en México.....	8
Túnel de Viento en Chetumal.....	10
Clasificación del Túnel de Viento.....	13
Rango de Velocidades de Operación.....	13
Topología Física	14
Capitulo II.....	16
Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo.....	16
Plano del Túnel de Viento en AUTOCAD	16
Ecuaciones Generales de la Mecánica de Fluidos	18
Ecuación de Continuidad	19
Ecuación de la Cantidad de Movimiento	20
Ecuación de la Conservación de la Energía.....	20
Ecuación de Bernoulli	21
Número de Reynolds	22
Instrumentación	26
Capítulo III	32
Problemática y Modificación del Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo	32
Pruebas Visuales con Hilos a Diferentes Frecuencias del Motor	32
Primera Parte.....	32
Segunda Parte.....	35
Tercera Parte.....	37
Modificación al Túnel de Viento, Primera Parte	39

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Modificación de la Unión Entre la Zona de Pruebas y la Zona de Contracción.....	40
Modificación de la Unión Entre la Zona de Pruebas y la Zona de Descarga	41
Reubicación del Motor Eléctrico en su Nueva Base	42
Modificación al Túnel de Viento, Segunda Parte	47
Capítulo IV	55
Adecuaciones Para Realizar la Caracterización del Flujo del Túnel de Viento	55
Capítulo V	59
Resultados y Análisis de Resultados	59
Pruebas al Túnel de Viento	59
Gráficas en Excel	59
Primer Prueba.....	60
Gráficas en Excel, Primer Prueba.	63
Segunda Prueba	69
Gráficas en Excel, Segunda Prueba.	73
Tercer Prueba.....	80
Gráficas en Excel, Tercer Prueba.	82
Comparación de las Gráficas de Excel.....	89
Varilla “A”	89
Varilla “B”	91
Varilla “C”	92
Varilla “D”	93
Varilla “E”	94
Gráficas Realizadas en un Programa en Línea.	95
Tercer Prueba.....	96
Capítulo VI	102
Conclusión	102
Capítulo VII	107
Recomendaciones	107
Capítulo VIII	109
Referencias Bibliográficas.....	109
Capítulo IX.....	111
Tablas	111

Objetivos

Objetivo General

Realizar la caracterización del flujo de aire del túnel de viento de la universidad de Quintana Roo (UQROO), con el objeto de que este equipo pueda ser usado en pruebas aerodinámicas a perfiles de álabes y en la calibración de instrumentos.

Objetivos Particulares

- Realizar los planos del Túnel de Viento en AutoCAD.
- Documentar las modificaciones realizadas al túnel de viento.
- Llevar a cabo mediciones de presión y velocidad en el Túnel de Viento, bajo diferentes condiciones de operación.
- Proponer las nuevas mejoras que deben realizarse al túnel de viento, con base en el análisis del flujo y buscando reducir la intensidad de turbulencia hasta los niveles recomendados en la literatura especializada.

Introducción

El túnel de viento o túnel aerodinámico es un equipo de investigación empleado en ingeniería con el que se obtienen flujos de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada en la denominada zona de pruebas. Ha sido desarrollado para realizar los estudios de los efectos del movimiento del aire alrededor de los objetos sólidos (Quispe, Urcuhuaranga, & Chiroque, 2014, p. 1).

Existen diversos fenómenos relacionados con la mecánica de fluidos y en especial con la aerodinámica que pueden ser estudiados mediante la utilización de un túnel de viento. Los túneles de viento permiten modelar situaciones reales a escala mucho menor, razón por la cual resultan tan prácticos, sin embargo para que esto sea posible es necesario que el túnel y el modelo a usar (que representa el sistema real a escala mayor) satisfagan ciertas condiciones de semejanza con la situación real que se desea estudiar, es por ellos que los números adimensionales de la mecánica de fluidos tales como el número de Reynolds y el Número de Darcy, deben de verificarse para establecer condiciones de semejanza entre los modelos reales y los prototipos a escala (Camacho, García, & Martínez, 2011, pte. 1).

En el presente trabajo, se realiza la Caracterización del Flujo del Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo, para que pueda ser empleado en trabajos futuros de pruebas aerodinámicas, calibración de instrumentos de medición, o bien laboratorio de los alumnos de la carrera de ingeniería en sistemas de energía, de la propia institución.

Primero que nada, se efectuó una limpieza general al instrumento de medición (túnel de viento), posteriormente se realizaron pruebas de operación, y también se elaboraron los Planos del Túnel de Viento.

Los trabajos principales de adecuación del túnel de viento, fueron encaminados a buscar reducir la turbulencia en el aire a la entrada del túnel, que en parte es debida a la vibración que se transmite a la estructura del túnel, tanto por parte del motor eléctrico, como del ventilador. Para esto, se han cambiado las juntas de cámara de la base del motor por unas juntas hechas con caucho de llanta. La polea de la flecha del ventilador se llevó al torno para encasquillar el diámetro interior, para que finalmente se ajustara la alineación entre la polea de la flecha del ventilador, y la polea del motor.

Cabe mencionar que todos estos detalles antes mencionados, afectan el aire que ingresa al túnel a través de la zona de admisión, y que al pasar hacia la zona de pruebas propicia la generación de turbulencia, es decir un movimiento no rectilíneo y no uniforme del flujo del aire.

Estos problemas ocasionan una mala estabilidad del flujo, y reducen la confiabilidad en los datos obtenidos de cualquier prueba que se realizase en el túnel.

La caracterización del flujo del “Túnel de Viento” deberá contar con los lineamientos estándar, según Bradshaw & Pankhurst (1964) “Los principales parámetros para caracterizar el flujo de un túnel de viento son: la uniformidad de los perfiles de velocidad y la turbulencia¹”.

Los resultados que se obtendrán de las pruebas en la “Cámara de Pruebas”, servirán como punto de partida para quienes estén interesados en seguir trabajando con el Túnel de Viento.

¹ En este caso, únicamente se trabajó con la “uniformidad de los perfiles de velocidad”.

Capítulo I

Antecedentes

Túnel de Viento y Función

Un túnel de viento es una herramienta utilizada en la investigación aerodinámica, adecuada para el estudio, verificación y desarrollo de técnicas de los efectos del aire en objetos sólidos, con el fin de entender el comportamiento de cuerpos o masas de aire que se mueven en un ambiente real (Mejía & Cardona, 2016, p. 15).

También “Diversos fenómenos relacionados con la mecánica de fluidos pueden ser estudiados mediante la utilización de un túnel de viento” (Camacho et al., 2011, pte. 1).

Consiste en un pasaje tubular en el cual el objeto se encuentra situado en el centro el cual está bajo prueba. Generalmente el objeto es sometido a diferentes velocidades de aire, las cuales son creadas a partir de un ventilador. “Este pasaje de prueba está equipado con sensores adecuados para medir las fuerzas aerodinámicas, distribución de la presión, resistencia de los materiales con que está fabricado u otras características relacionadas con la aerodinámica” (Mejía & Cardona, 2016, p. 15).

Historia del Túnel de Viento

Después de que el hombre se da cuenta que para volar necesita más que imitaciones rudimentarias del aleteo de las aves y comprende que debe aumentar su conocimiento en lo que hoy en día llamamos aerodinámica, crea aparatos e instrumentos que le permitan medir las fuerzas que experimentan los cuerpos dentro de fluidos en movimiento. Desde el siglo XVIII rondaba la idea de que estas fuerzas dependían de la velocidad relativa entre el cuerpo y el

fluido, por ello se diseñaron brazos mecánicos que se desplazaban sobre rieles, sosteniendo distintos prototipos; el problema de este sistema era que el modelo se movía a través de un flujo turbulento, desordenado por el movimiento del brazo. Para obviar este obstáculo, se decidió dejar el modelo quieto y hacer que circule el aire alrededor de él; y si a esta idea la colocamos dentro de un ducto, obtenemos lo que conocemos como un túnel de viento (Arq. Carlos Treviño, 2005, p. 17).

En 1746 el matemático Inglés Benjamin Robins encontró en sus experimentos con brazos robóticos, que la forma del brazo parecía afectar la fricción o el arrastre, aun cuando las diferentes formas de brazos estuvieran sometidas a las mismas corrientes de aire Sandra Mejía & Lina Cardona (citado en Baals y Corliss, 1981).

Según Mejía y Cardona (2016): “Una de las conclusiones más importantes de Robins es que la mecánica Newtoniana tradicional no describe adecuadamente las complejas relaciones que existen entre la fricción y la velocidad del flujo del aire con la forma y orientación del objeto” (p. 16).

Sólo hasta 1871, el Ingeniero Naval Francis Wenham presentó lo que puede considerarse como el primer diseño de túnel de viento, que se utilizaría para estudiar todos los factores que influyen sobre la morfología de las aeronaves. (Mejía y Cardona, 2016, p. 16).

Los hermanos Wright, considerados pioneros estadounidenses de la aviación, a penas con sus estudios de bachillerato terminados, crearon una empresa de reparación de bicicletas para ganarse la vida, lo que les permitió financiar sus investigaciones relativas al vuelo, a las que empezaron a dedicarse de manera sistemática a partir de 1899. Conocedores de los trabajos del alemán Otto Lilienthal, fallecido en un accidente durante uno de sus vuelos planeados cerca de Berlín, quien durante muchos años había creado un sinfín de planeadores y establecido los

principios fundamentales del vuelo planeado, y de los del ingeniero y arquitecto estadounidense Samuel Pierpont Langley, que desarrolló diversos principios de la aerodinámica y explicó el proceso por el cual el aire puede sustentar las alas, se lanzaron a la construcción de cometas y planeadores biplanos, que perfeccionaron gracias a la introducción de elementos como el timón vertical, el elevador horizontal y los alerones Sandra Mejía & Lina Cardona (Citado en Serpa, Bermeo y Siguencia, 2012).

Los trabajos de los hermanos Wright y la incorporación de estas mejoras les permitieron pronto controlar por completo el movimiento en las tres direcciones necesarias para el vuelo. Para probar sus desarrollos inventaron una instalación, conocida en la actualidad con el nombre de túnel de viento (1901), en la que podían poner a prueba las características aerodinámicas de los inventos que más tarde construirían, como la máquina voladora de 9.76 metros de envergadura y 1.52 metros de cuerda, equipada con una cola vertical doble, en la cual se basaron para construir el aeroplano al que, en 1903, adaptaron un motor de combustión interna, este fue el primer objeto volador más pesado que el aire (Mejía & Cardona, 2016, p.16).

A comienzos del siglo XX, Gustav Eiffel inició una investigación midiendo las fuerzas aerodinámicas de los objetos que caían desde la segunda plataforma de la Torre Eiffel, a 377 pies sobre el nivel del suelo. Posteriormente en 1909 inició la construcción de un túnel de viento a la sombra de la Torre Eiffel. Su sección de prueba era de 1.5 m de diámetro, y su ventilador fue accionado por un motor eléctrico que también alimentaba a la torre. En 1912 construyó un túnel de viento más grande, del cual diseñó y patentó la entrada acampanada y el difusor, lo que permitió que la presión en la sección de prueba fuera inferior a la presión en el hangar. Los experimentos de Eiffel llevaron a una serie de avances significativos, pues fue pionero en realizar pruebas con modelos de aviones completos, y demostró por primera vez, la fuerte caída

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

en el coeficiente de arrastre de una esfera con número de Reynolds, por encima de 300,000 (Morales, Gómes, Paz, Navarro, & Barbosa, 2018, p. 8-9).

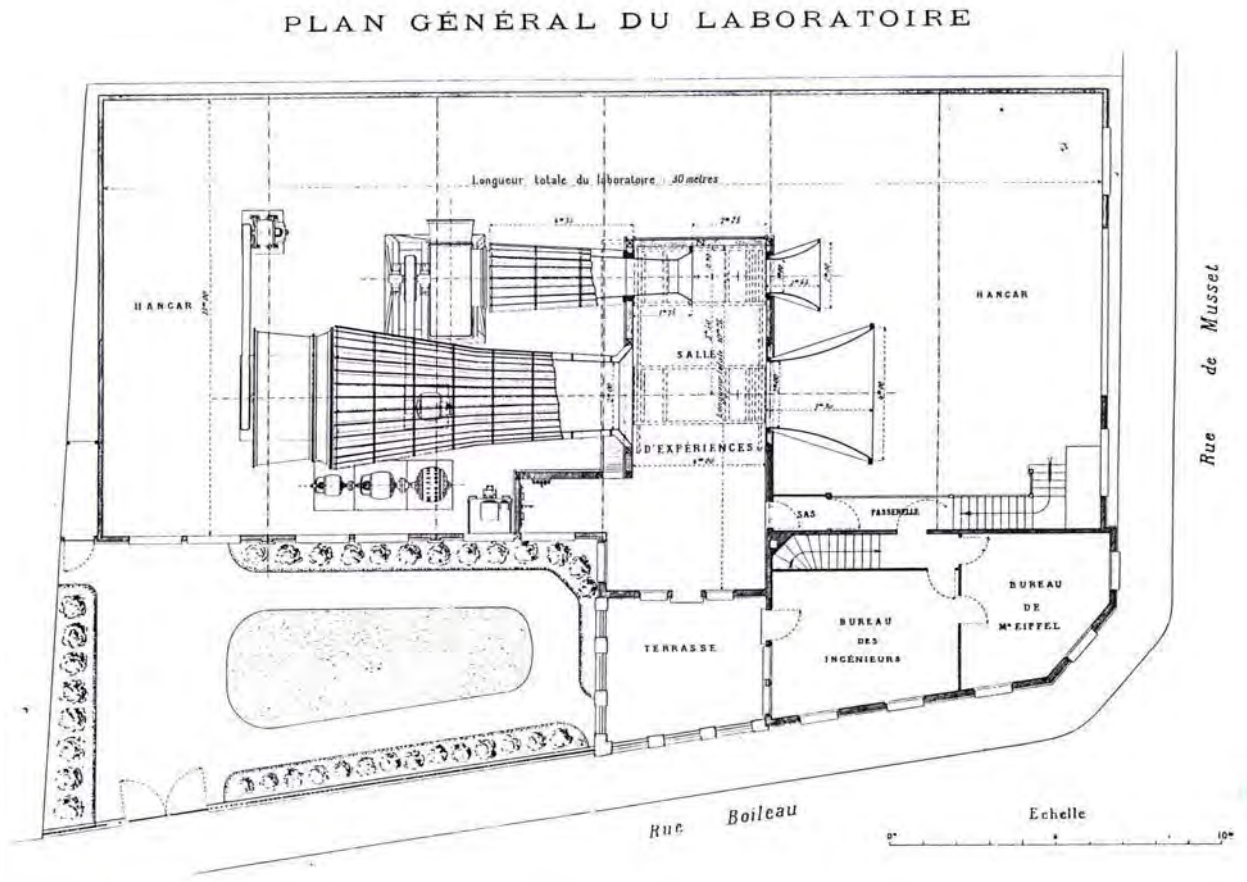


Figura 1. Túnel de Viento diseñado por Eiffel.
Elaborado por Morales et al., 2018.

En 1907 Ludwig Prandtl solicitó a la sociedad Alemana para el estudio del Dirigible que financiara la construcción de un túnel de viento, con un costo de 2000 marcos. El diseño consistía de un circuito cerrado de forma rectangular, el cual contaba con estabilizadores de flujo y un panel de aguas abajo del ventilador, además de cascadas de álabes giratorios en cada esquina. Sin embargo, debido a que casi todo el circuito tenía la misma sección transversal, la velocidad del flujo era la misma y por tanto, la calidad del flujo no era buena. El túnel fue

construido en 1908, y en 1909 comenzó el trabajo práctico en la aerodinámica en los dirigibles. El túnel de viento encarnó por primera vez muchas características que se han convertido en estándar, en la mayoría de los túneles construidos desde entonces, de hecho, en los años que siguieron, estos tendieron a clasificarse como el diseño de Eiffel o de Götting (Morales et al., 2018, p. 8-9).

Túnel de Viento en México

En México: “sólo hasta años recientes se construyeron túneles de viento para fines de investigación y desarrollo tecnológico. Los más importantes son diseñados y construidos por las instituciones educativas de mayor reconocimiento del país y se mencionan a continuación” (Morales Contreras, Gómez Roa, Paz Gonzáles, Navarro Torres, & Barbosa Saldaña, 2018, p. 10):

Túnel de viento subsónico del IPN (Instituto Politécnico Nacional): en el año 2010 la ESIME (Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica) lo puso en operación, está ubicado en el LABINTHAP (Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada), el cual es de circuito abierto y tiene 5 m de largo y una sección transversal de 0.8 m x 0.6 m. El ventilador centrífugo de 74.6 kW permite tener una velocidad máxima de 270 km/h, y gracias a los dispositivos que lo componen, en la zona de pruebas se tiene una intensidad de turbulencia menor al 4 %, lo que lo ubica a los niveles de los más importantes del mundo. Este túnel tiene por objetivo principal servir como un patrón nacional secundario de calibración, en instrumentos de medición de velocidad, tales como tubos de Pitot tipo L y S, anemómetros tipo turbina, ultrasónicos, térmicos, de copas y de propela, así como instrumentos de gran aplicación en los procesos industriales de combustión, ventilación y aire acondicionado, energía eólica, fuentes fijas en generación

eléctrica, e industria del vidrio, entre otros (Morales Contreras, Gómez Roa, Paz Gonzáles, Navarro Torres, & Barbosa Saldaña, 2018, p. 10).

A continuación en la figura 2, se presenta el Túnel de Viento de LABINTHAP.



Figura 2. Túnel de Viento de LABINTHAP del IPN.

Túnel de viento de la UNAM (Universidad Autónoma de México): el 3 de febrero de 2015 entró en operación, está ubicado en el LemAT (Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología), el cual es de circuito cerrado, tiene 37.75 m de largo y cuenta con dos secciones de pruebas: la primera incluye dos área de 3 metros de ancho por 2 metros de alto cada una, separadas por una distancia de 14 m, y la segunda es de 4.3 m de ancho por 4 m de altura y 5 m de longitud. El ventilador puede generar una velocidad máxima de 100 km/h, suficiente para simular los efectos turbulentos del viento bajo diferentes condiciones de flujo. Durante una simulación o estudio se pueden analizar, en modelos a escala, los efectos del viento equivalentes a un huracán de categoría 4, lo que indica la línea de investigación de este dispositivo y el desarrollo de la infraestructura en México, como son: puentes, edificios, túneles, vivienda,

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

plantas industriales, presas, vialidades, carreteras y estructuras marinas, entre otras (Morales Contreras, Gómez Roa, Paz Gonzáles, Navarro Torres, & Barbosa Saldaña, 2018, p. 10).

A continuación en la figura 3, se presenta el Túnel de Viento de LemAT.



Figura 3. Túnel de Viento de LemAT de la UNAM.

Túnel de Viento en Chetumal

La ciudad de Chetumal desde mediados de los noventa cuenta con la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía, la cual se encuentra en la UQROO. Esta carrera por su relación con las energías renovables, necesitaba estudiar de alguna manera el comportamiento del flujo del aire hacia los objetos; como realizar pruebas aerodinámicas a diseños de álabes de turbinas eólicas, a perfiles diseñados a escala, etc.; fomentar el área de la energía eólica y el área de mecánica de fluidos.

En el 2006 la UQROO adquiere su primer túnel de viento. La carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía cuenta con materias como por ejemplo eólica y mecánica de fluidos, estas

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

necesitan realizar prácticas en el túnel de viento para poder entender mejor la teoría vista en clases. Hasta el día de hoy el túnel de viento funciona correctamente.

A continuación se hace una descripción del túnel antes mencionado: el Túnel de Viento Subsónico C2 de Armfield, proporciona una extensa instalación autónoma completa para el estudio de la Aerodinámica subsónica. Es Sencillo y seguro de operar; gracias a su rendimiento e instrumentación puede ser utilizado para proyectos sencillos de investigación (Armfield, 2019).

El aire del exterior es inducido por el ventilador, éste es “movido por un motor de corriente alterna (CA) alimentado por una unidad inversora de control de velocidad, lo que permite el control uniforme de la velocidad en el aire” (Armfield, 2019). El aire ingresa a través de la campana, desplazándose por la zona de contracción atravesando un “estabilizador de flujo tipo panel diseñado para asegurar que el flujo sea constante tanto en magnitud como en dirección, y que tenga un perfil de velocidad transversal plano” (Armfield, 2019). El aire entra en la zona de prueba y se dirige a la zona de descarga, éste contribuye a la estabilidad del flujo. Por último el aire es expulsado por el ventilador hacia el exterior de nuevo.

Sus beneficios y cualidades permiten que: “la precisión del túnel y su instrumentación hacen que sea adecuado para trabajos de estudiantes universitarios y proyectos de investigación sencillos” (Armfield, 2019).

A continuación en la figura 4, se presenta el primer túnel de viento de la UQROO que se encuentra en el taller de ingenierías.



Figura 4. Túnel de Viento Subsónico C2.

En el 2011 la UQROO adquiere su segundo túnel de viento. Este es de mayor magnitud, también cuenta con más aplicaciones que el que llegó en el 2006. Se comenzó a trabajar con él en su momento, pero después se dejó de usar; hoy en día el túnel de viento no se encuentra operando al 100%.

Debido al tiempo en que estuvo en desuso, el túnel de viento se deterioró considerablemente, por tal motivo, este es el problema y objetivo de esta tesis que se resolverá: rehabilitarlo para que la comunidad estudiantil interesada de Chetumal QROO pueda utilizarlo.

Hoy en día, la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía de la UQROO necesita rehabilitar el túnel de viento de estas dimensiones. No se pueden hacer investigaciones en él, no se pueden hacer prácticas en él. El equipo actualmente ocupa desgraciadamente un grande espacio en el taller que podría bien otro equipo que si funcione utilizar. Este es importante debido a que cuenta con una amplia variedad de aplicaciones, como por ejemplo: “ensayos aeronáuticos, ingeniería civil, arquitectura, energías renovables, medio ambiente, entrenamiento deportivo e investigación y desarrollo agrícola” (Quispe et al., 2014, p. 1).

Clasificación del Túnel de Viento

“Existen dos parámetros que definen este tipo de instalaciones por encima de las demás clasificaciones: rango de velocidades de operación y topología física” (Alberto, 2012, p. 8-11).

El número de Mach define la magnitud de la instalación, con base a este número se definen las actividades que puede llevar a cabo el túnel de viento. El número de Mach es la medida de la velocidad del viento que llega a alcanzar un objeto sólido comparado con la velocidad del sonido. Estas diferentes medidas de Mach son etiquetadas con el nombre de: baja velocidad, subsónicos, transónicos, supersónicos e hipersónicos.

La topología física del túnel de viento se refiere al tipo de retorno al que fue diseñada la instalación del túnel de viento que puede ser de “tipo abierto” o de “tipo cerrado”. También la topología física del túnel de viento se refiere al tipo de configuración de la cámara de pruebas, esta puede ser de: “sección abierta” o “sección cerrada. A continuación en el siguiente apartado se describen estos dos parámetros.

Rango de Velocidades de Operación

Según Martínez (2009) afirma sobre el régimen de trabajo lo siguiente:

Una de tantas clasificaciones se realiza en función de la velocidad de flujo de aire U , donde se distingue el número de Mach $M = U/C$ del túnel, donde C es la velocidad del sonido. Si $M < 1$ el túnel es subsónico, y si $M > 1$ es supersónico.

A continuación en la tabla 1, se presenta la clasificación teniendo en cuenta la velocidad del flujo a su paso por la sección de prueba.

Tabla 1.

Clasificación según la velocidad.

Rango de Velocidad	
Tipo	Velocidad Óptima
De baja velocidad	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

Elaboración propia basada en (Alberto M. Diseño y Análisis Computacional para Túneles de Viento de Baja Velocidad).

Topología Física

Dos parámetros son considerados en la clasificación: tipo de retorno y configuración de la cámara de ensayo (Alberto, 2012, p. 8-11).

Según Tipo de Retorno

- Circuito abierto: El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta; penetra en el circuito desde el exterior a través de la sección de entrada, que suele albergar la zona de acondicionamiento de flujo. Llega al cono de contracción donde pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente en la cámara de ensayo. A continuación, circula a través del difusor y la sección del propulsor, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección de salida.
- Circuito Cerrado: El flujo fluido describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior (Alberto, 2012, p. 8-11).

Según Su Configuración de la Cámara de Ensayo

- Sección abierta: La cámara de ensayo comunica por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior.
- Sección cerrada: La sección de pruebas posee paredes sólidas que la aíslan al flujo fluido del exterior durante el ensayo (Alberto, 2012, p. 8-11).

Capítulo II

Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo

El segundo “Túnel de Viento” que obtuvo la Universidad de Quintana Roo, el cual es el objeto de este trabajo de tesis, se puede clasificar como del tipo subsónico de circuito abierto, así como de acuerdo por el diseño de la sección de prueba es de sección cerrada. Cuenta con una sección (área) de trabajo rectangular, de 60x62 cm². También cuenta con su respectiva planta de potencia y regulación.

Plano del Túnel de Viento en AUTOCAD

El motivo por el cual la UQROO necesita el plano del túnel de viento es porque la escuela no cuenta con uno, el plano servirá para poder visualizar desde otra perspectiva al túnel de viento. Es por ello que se realizaron en AUTOCAD 7 vistas, las cuales se creyeron pertinentes. A continuación se presenta la vista: lateral de todo el túnel de viento, lateral de la campana, frontal de la zona de acondicionamiento de flujo, lateral del cámara de pruebas, lateral del cono difusor, lateral de la cámara del ventilador, lateral del motor y de la flecha del ventilador.

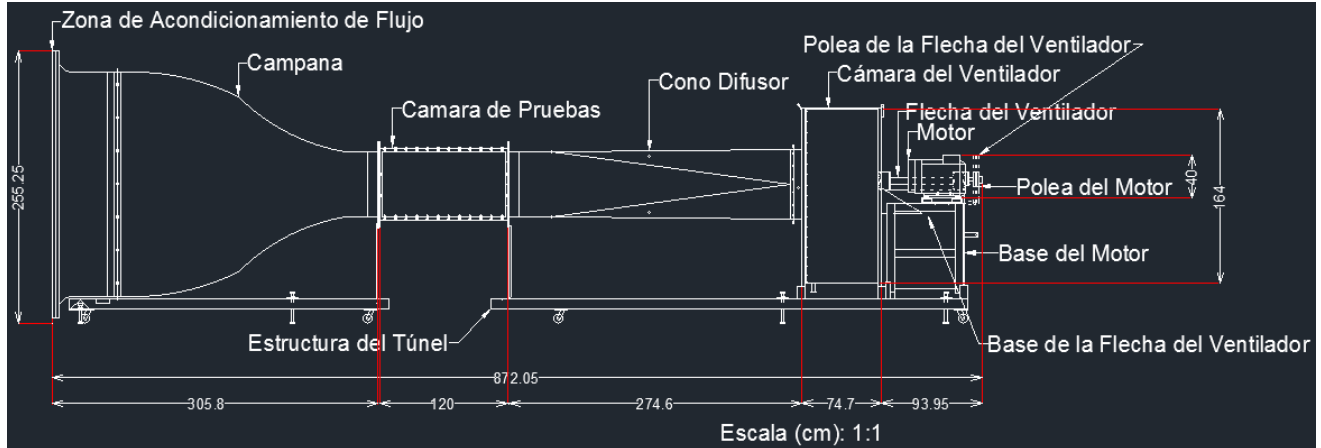


Figura 5. Vista Lateral del Túnel de Viento.

Esta es la vista más importante que se realizó en Autocad, ya que se puede visualizar de manera muy clara las dimensiones, los componentes y los detalles del túnel de viento.

El aire es inducido por el ventilador al interior de la campana, sigue su recorrido por la zona de contracción, ingresando a la zona más importante, la zona de pruebas; finalmente el flujo del aire sigue su camino por el conducto difusor, y es expulsado al exterior por el conducto de salida.

A continuación en la figura 6, se presenta la vista lateral de la campana del túnel de viento.

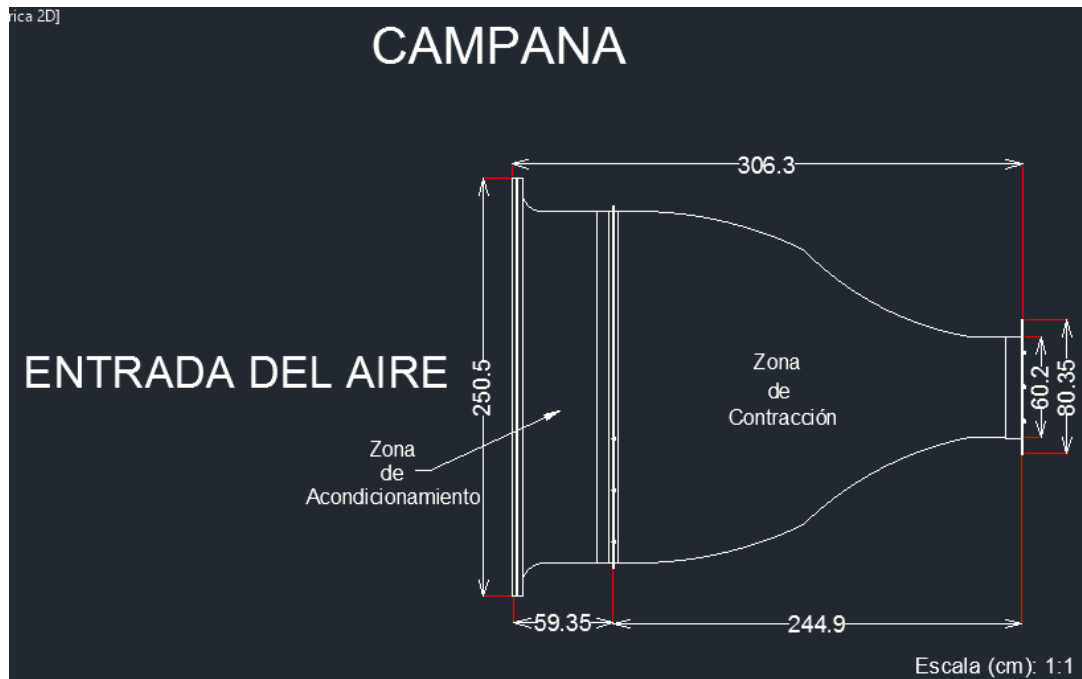


Figura 6. Vista Lateral de la Campana del Túnel de Viento.

La sección del cono de contracción se sitúa entre la zona de acondicionamiento y la cámara de ensayo. Su misión consiste en dotar al flujo, adecuadamente acondicionado, de la velocidad necesaria para realizar el ensayo. Tal aceleración es generada mediante una reducción gradual de su sección recta, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite en la cámara de ensayo y evitando la formación de vórtices. De acuerdo a la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, el incremento de velocidad a la salida de esta sección, va acompañado de una reducción de presión de la misma (Alberto, 2012, p.7).

Ecuaciones Generales de la Mecánica de Fluidos

Las ecuaciones que rigen toda la mecánica de fluidos se obtienen por la aplicación de los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Para

generalizar se usa el teorema de transporte de Reynolds y el teorema de la divergencia (o teorema de Gauss), todo esto, para obtener las ecuaciones en una forma más útil para la formación euleriana (Medina, p. 32).

Según la opinión de Medina: “Las tres ecuaciones fundamentales son: la ecuación de continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento, y la ecuación de la conservación de la energía” (p. 32).

Ecuación de Continuidad

Es un caso particular del principio de conservación de la masa. “Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción” (Argumedo Teuffer, p. 10-11).

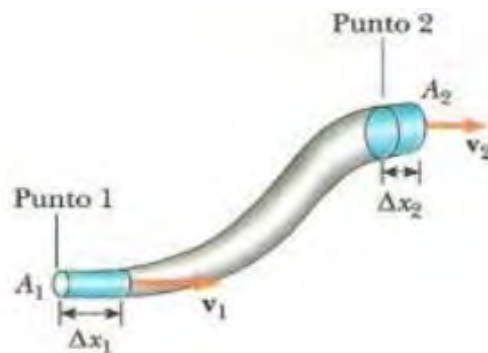


Figura 7. Conservación de Caudal.

$$Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2)$$

Donde:

Q : Caudal.

V : Velocidad del Fluido.

A : Área de Sección Transversal Fluido.

Ecuación de la Cantidad de Movimiento

Segunda ley de Newton, “es la importancia que adquiere la masa con la velocidad” (Cajal Caviña, 2016, p. 10).

$$\rho g - \nabla p - \nabla \cdot \tau_{i,j} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Donde:

g : Gravedad.

$\tau_{i,j}$: Tensor de Esfuerzos Viscosos.

p : Presión.

V : Vector de Velocidad.

ρ : Densidad.

Ecuación de la Conservación de la Energía

Primera ley de la termodinámica, “afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía” (Chicas Molina, 2012, p. 35).

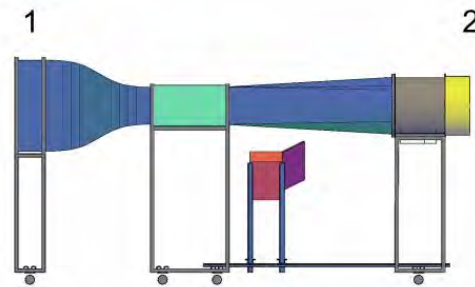


Figura 8. Pérdidas del Túnel de Viento.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\Delta P_{1-2}}{\gamma} \quad (4)$$

Donde:

P_{1-2} : Presión en el punto (Pa).

$Z_{1,2}$: Nivel de altura (Pa o kg/ms^2).

ΔP_{1-2} : Pérdidas de energía debido a la fricción y a las pérdidas menores (Pa).

P_v : Presión del Ventilador (Pa).

γ : Peso específico ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}^2$).

Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli establece la relación entre la presión estática y dinámica a lo largo de una línea de corriente en un movimiento potencial, incompresible y estacionario. Esta ecuación expresa que la presión total o de remanso de todas las partículas fluidas que discurren a lo largo de una misma línea de corriente es la misma. La ecuación de Bernoulli [ecuación (5)] es una consecuencia del principio de conservación de la cantidad de movimiento, pues en régimen incompresible, en ausencia de turbulencia y fricción, no puede haber pérdida de presión de remanso a lo largo de una línea de corriente. Las hipótesis que han permitido obtener esta

sencilla relación entre presión estática y velocidad restringen su aplicación para aquellas regiones del dominio fluido en las que no sean dominantes los efectos viscosos y turbulentos, como es el caso de estelas y capas límites (AbreProyectosFichero, p. 105).

$$\frac{v^2}{2g} + y + \frac{P}{\rho g} = \text{constante} \quad (5)$$

Donde:

v = Velocidad del fluido en la sección considerada.

g = Aceleración de la gravedad.

y = Altura geométrica en la dirección de la gravedad.

P = Presión a lo largo de la línea de corriente.

ρ = Densidad del fluido (Medina Mota, p. 33-34).

Número de Reynolds

El número de Reynolds [ecuación (6) y (7)] es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. En conductos, si el número de Reynolds es menor a 2000 el flujo será laminar y si es mayor a 4000 el flujo será turbulento, y si se encuentra en medio se conoce como flujo transicional y su comportamiento no puede ser modelado (Medina, p. 34-35).

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (6)$$

O bien,

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (7)$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido.

v_s : Velocidad característica del fluido.

D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido.

μ : Viscosidad del fluido.

ν : Velocidad cinemática del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

A continuación en la figura 7, se presenta la vista frontal (zona de acondicionamiento de flujo) del túnel de viento. Esta zona cuenta a la entrada con un filtro de “guata blanca” para eliminar la mayor cantidad de polvo que absorbe el túnel de viento, esto debido a que se manejan instrumentos de medición bastante delicados en la zona de pruebas.



Figura 9. Vista Frontal (zona de acondicionamiento de flujo) del Túnel de Viento.

Esta sección tiene como propósito dotar al flujo de los parámetros de calidad necesarios (dirección, turbulencia, perfil de velocidades, etc.) para una correcta realización del ensayo. Tal acondicionamiento se consigue haciendo circular el fluido a través de una serie de dispositivos que le confieren una turbulencia isótropa (la fluctuación media de la corriente turbulenta es igual en todas direcciones, incluso en escalas de longitud pequeñas) y eliminan los vórtices de mayor tamaño, dejando pasar únicamente aquellos de pequeña magnitud que se extinguirán rápidamente en secciones posteriores. Estos dispositivos son (Alberto, 2012, p. 7):

- Panel de abejas: Elementos en forma de panel mallado cuya función es la de dotar al flujo de la dirección deseada. El fluido circula a través de los diferentes elementos de la malla adoptando una disposición de filamentos paralelos a su paso.

- Pantallas de turbulencia²: Dispositivos encargados de uniformar el perfil de velocidades del fluido, a costa sin embargo, de una considerable pérdida de presión. En la realización de esta función introducen, además, pequeñas turbulencias en el flujo.

A continuación en la figura 10, se presenta la vista lateral de la cámara de pruebas.



Figura 10. Vista Lateral de la Cámara de Pruebas.

Esta sección es el componente más importante de un túnel de viento, siendo en este donde se realiza el ensayo. En ella se instala el modelo bajo estudio, controlando que el flujo fluido presente unas características de turbulencia y velocidades idóneas para una correcta reproducción de la situación que se pretende simular (Alberto, 2012, p. 6).

² El túnel de viento que se caracterizará no cuenta con estas “pantallas de turbulencia”. Por lo tanto se omite su función en este caso.

Instrumentación

Manómetro de Agua (o de Mercurio), Tubo de Pitot y Anemometría de Hilo Caliente

Un factor determinante en la definición de las prestaciones de un túnel aerodinámico es el de la instrumentación de medida disponible, puede ser muy variable dependiendo del tipo de ensayos que se desee o pueda realizar. Los elementos clásicos del equipamiento de un túnel de aerodinámico son los transductores de presión y de cargas y los transductores de velocidad. En este caso se utilizó un tradicional manómetro de agua que bien pudo ser de mercurio, estos son transductores de presión mecánicos, que transforman una señal de presión en una determinada altura de columna de líquido. Respecto a los manómetros de velocidad, se utilizó el tubo de Pitot, sin duda el más conocido. Estos están formados por dos tubos concéntricos y para las medidas se coloca con el eje común orientado a la corriente. De esta forma, el tubo interior tiene su extremo abierto orientado a la corriente incidente; por otra parte, el tubo exterior está provisto de taladros laterales dispuestos en una sección suficientemente alejada de la inicial, taladros que durante a la medida quedan orientados perpendicularmente a la corriente incidente. Cuando se conectan las salidas de los tubos de Pitot a un manómetro, la presión en el tubo interior, dado que no hay movimiento en el mismo y en su extremo hay un punto de remanso, será la de remanso, P_0 , mientras que en los orificios del tubo exterior se medirá la presión estática, p , registrándose por tanto en el manómetro la diferencia (AbreProyectosFichero, p. 103-105):

$$p_0 - p = 1/2\rho U^2 \quad (9)$$

A continuación en la figura 11, se presenta al tubo de Pitot instalado en la cámara de pruebas.

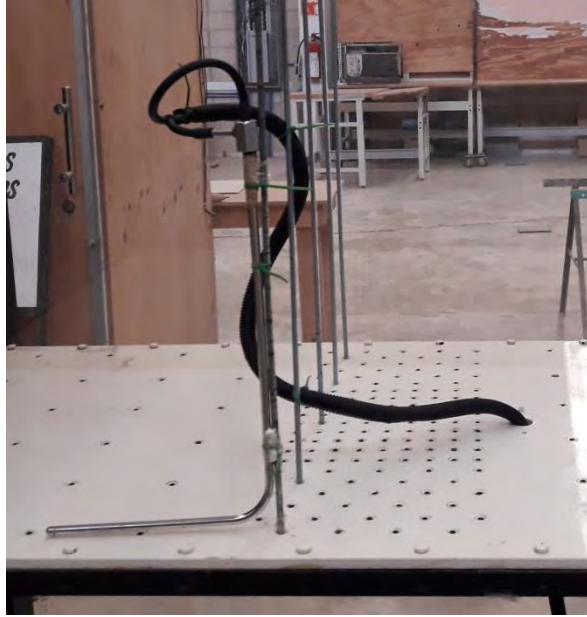


Figura 11. Tubo de Pitot.

Otro modo más sofisticado que se utilizó para medir la velocidad del fluido es el que se conoce con el nombre de anemometría de hilo caliente, este se basa en el hecho de que un hilo conductor calentado eléctricamente sometido a una corriente incidente es enfriado por ésta. La resistencia eléctrica del hilo depende de la temperatura y este hecho proporciona un medio para medir la temperatura fácilmente o para mantenerla constante si esto es lo que se desea. (AbreProyectosFichero, p. 103-105).

Se presenta a continuación en la figura 12 al hilo caliente.



Figura 12. Hilo Caliente.

A continuación en la figura 13, se presenta el cono difusor del túnel de viento.

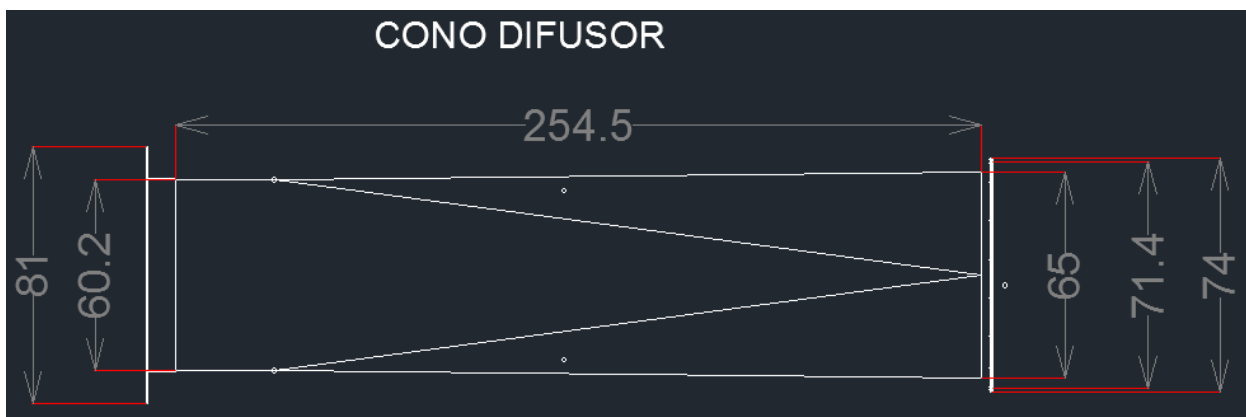


Figura 13. Cono Difusor del Túnel de Viento.

La etapa del difusor se sitúa a continuación de la sección de pruebas, realizando la tarea opuesta que ejecuta el cono de contracción, disminuye la velocidad e incrementa la presión del flujo, mediante un aumento progresivo de su sección recta, posibilitando así el uso de propulsores menos potentes para mantener la velocidad del flujo (Alberto, 2012, p. 8).

A continuación en la figura 14, se presenta la cámara donde se encuentra el ventilador del Túnel de Viento.

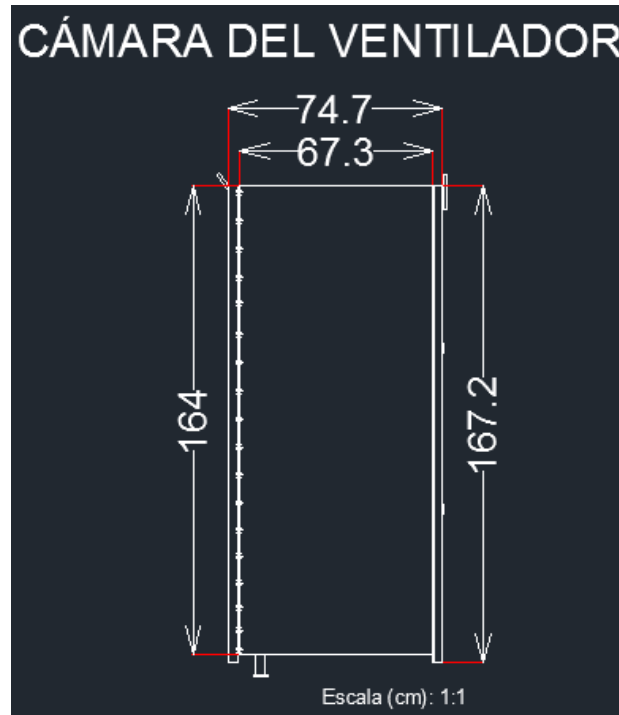


Figura 14. Cámara del ventilador del Túnel de Viento.

Esta sección alberga el ventilador, este absorbe el aire del exterior, el cual pasa por todas las secciones del túnel de viento, para que finalmente sea expulsado al exterior nuevamente.

El ventilador del túnel de viento se encuentra en mal estado; al ir incrementado la frecuencia al motor, el ventilador se mueve de manera desbalanceada, en un movimiento de “vaivén”, ocasionando vibración en toda la estructura del túnel de viento, esto impide incrementar la frecuencia del motor a velocidades más rápidas.

A continuación en la tabla 2, se presentan las características del motor, y en la figura 15, se presenta el motor y la flecha del ventilador junto con su base.

Tabla 2.

Características del motor.

TIPO MBT ARM <u>180L (286TS)</u>		CP <u>30</u>	
TCCV <u>3~</u>	60 Hz	FS <u>1.0</u>	RPM <u>3500</u>
VOLT. <u>220/440</u>	AMP <u>72/36</u>		
DISEÑO <u>B</u>	CLAVE KVA ROT. BLOQ. <u>G</u>	AISL. CLASE <u>F</u>	AMB. <u>40°C</u>
No. <u>M95K-27405</u>	OPERACIÓN <u>CONTINUO</u>		

Elaboración propia.

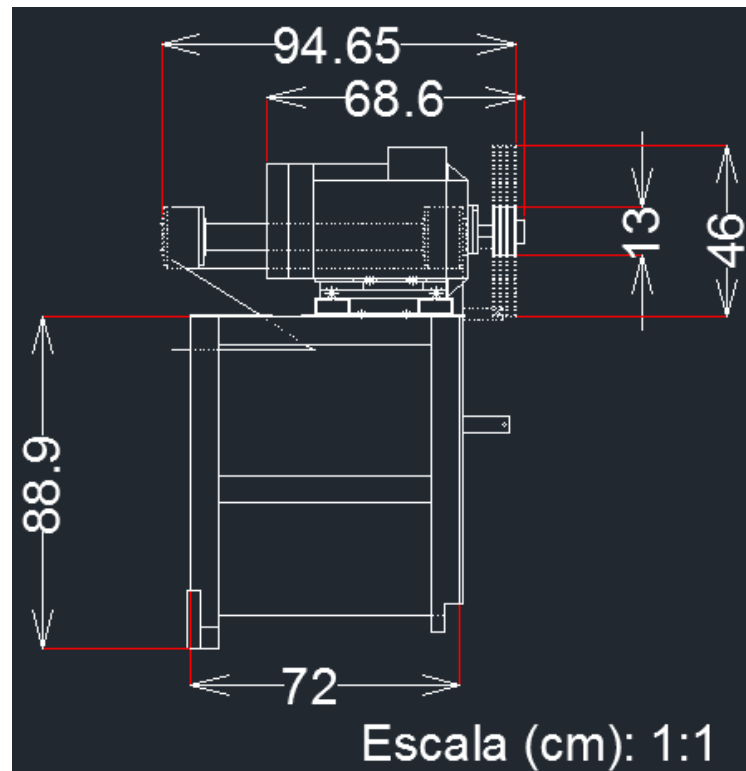


Figura 15. Motor y Flecha del ventilador del Túnel de Viento.

El motor eléctrico en general se encuentra en excelentes condiciones, está ubicado en la misma estructura a un costado de la flecha del ventilador. El motor fue reubicado debido a que se buscaba reducir la vibración que éste le transmitía a toda la estructura. No se obtuvo éxito en esta

operación, pero sí, se encontró una opción más; la cual consistía en reubicar el motor fuera de la estructura del túnel.

Capítulo III

Problemática y Modificación del Túnel de Viento de la Universidad de Quintana Roo

Pruebas Visuales con Hilos a Diferentes Frecuencias del Motor

No fue hasta en el año 2014, que se realizó un diagnóstico al túnel de viento de área de trabajo de $60 \times 62 \text{ cm}^2$, mediante unas pruebas de visualización con hilos de algodón³, la cual se dividió en tres partes. Lo que tienen en común las tres pruebas es que, en los costados del área de entrada del flujo del aire a la cámara de pruebas se colocaron hilos de algodón para visualizar el comportamiento del flujo del aire en esos puntos específicos, ahora bien, la diferencia que existe entre las tres pruebas es que, en la segunda prueba se colocó el tubo de Pitot en el centro añadiéndole también hilos de algodón para observar el comportamiento del flujo del aire en esa área específica; la tercer y última prueba se le anexó una extensión vertical al tubo de Pitot, para verificar si efectivamente por el centro pasaba únicamente el flujo del aire de manera uniforme.

En estas pruebas se detectaron problemas, como por ejemplo que, el aire que entra a la cámara de pruebas no es uniforme, la mayor parte del aire pasaba por la parte central de la cámara de pruebas. Más adelante con base a los resultados en las tres pruebas de visualización se hicieron las primeras adecuaciones.

Primera Parte

El objetivo de esta primera parte del diagnóstico, realizar una evaluación de las condiciones en el que se encontraba los costados del túnel de viento. Al incrementar la frecuencia deberían los hilos de algodón en el mejor caso levantarse de igual forma.

³ Diagnóstico elaborado por el personal del taller de ingenierías de la UQROO en 2014.



Figura 16. *Primer Prueba Visual con Hilos de Algodón. a) Comienzo del movimiento a 1.5 Hz. b) Incremento de la frecuencia del motor a 2.5 Hz. c) Incremento de la frecuencia del motor a 5 Hz. d) Incremento de la Frecuencia del Motor a 15 Hz.*

- a) Se comenzó la prueba con una frecuencia de 1.5 Hz; el flujo del aire parece no tener efecto en los costados de la entrada a la cámara de pruebas. Los costados sufren el efecto del fenómeno de capa límite⁴, ya que en los costados se alojan unas cejas (pestañas) que impiden el paso del viento por toda el área de la entrada a la zona de pruebas. Estas cejas generan turbulencia en los costados.
- b) Se incrementó la frecuencia del motor a 2.5 Hz; como era de esperarse, por el mismo motivo anterior el flujo del aire que pasa por la entrada de la zona de pruebas no tuvo

⁴ Capa Límite. Es la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto.

Cuando un cuerpo está sumergido en un flujo, se obtienen dos regiones de flujo principalmente: a) Capa Límite, la viscosidad tiene una importancia preponderante y que consiste en una capa muy delgada adyacente a la superficie del cuerpo. b) el resto del flujo que esta fuera de la capa límite, donde los efectos de la viscosidad pueden ser ignoradas. La teoría de la capa límite, establece la forma geométrica que deben tener los cuerpos para evitar la separación y formación de los torbellinos (Rojas Zevallos, 2008, p. 12-13).

ningún efecto con los hilos de algodón atados en los costados; los hilos de algodón del costado superior se levantaron aproximadamente en un ángulo de 45° por el flujo del aire que pasa por el centro de manera uniforme.

- c) Se incrementó la frecuencia del motor a 5 Hz; se puede observar en los hilos de algodón del costado superior de la entrada de la cámara de pruebas, que la velocidad se incrementó porque los hilos de algodón estaban aproximadamente a 60° , el comportamiento de esta prueba sigue siendo el mismo de las anteriores.
- d) Por último se incrementó a 15 Hz la frecuencia del motor; se observa que el flujo del aire no pasa aún por los costados del área de la entrada de la zona de pruebas, esto es por el mismo motivo de las pruebas anteriores, las cejas provocan el efecto de capa límite, generando turbulencia en los costados.

A continuación en la figura 17, se presenta el fenómeno de capa límite, al igual que se consigue observar cómo se generan torbellinos de flujo del aire debido al choque del flujo del aire en las uniones (pestañas) de la cámara de pruebas y la zona de contracción.

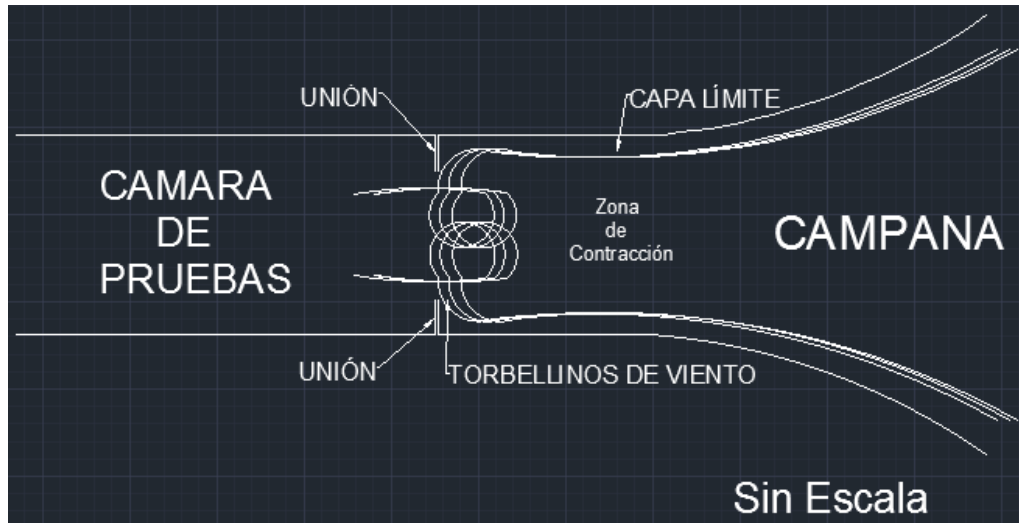


Figura 17. Fenómeno Capa Límite.

Esta unión entre la cámara de pruebas y la zona de contracción son físicamente pestañas (cejas) alrededor de los bordes del área de la entrada a la cámara, éstas afectan el flujo del aire que ingresa a la cámara que debería pasar de manera uniforme, éstas por el contrario generan torbellinos de flujo del aire los cuales afectan las mediciones.

Segunda Parte

En esta segunda parte de las pruebas visuales, la diferencia que existe entre la primera parte es que, en la segunda prueba se colocó el tubo de Pitot en el centro añadiéndole también hilos de algodón para observar el comportamiento del flujo del aire en esa área específica. De igual manera se fue aumentando la frecuencia; el motivo de la prueba fue observar el comportamiento del flujo del aire en la parte central de la cámara de pruebas.

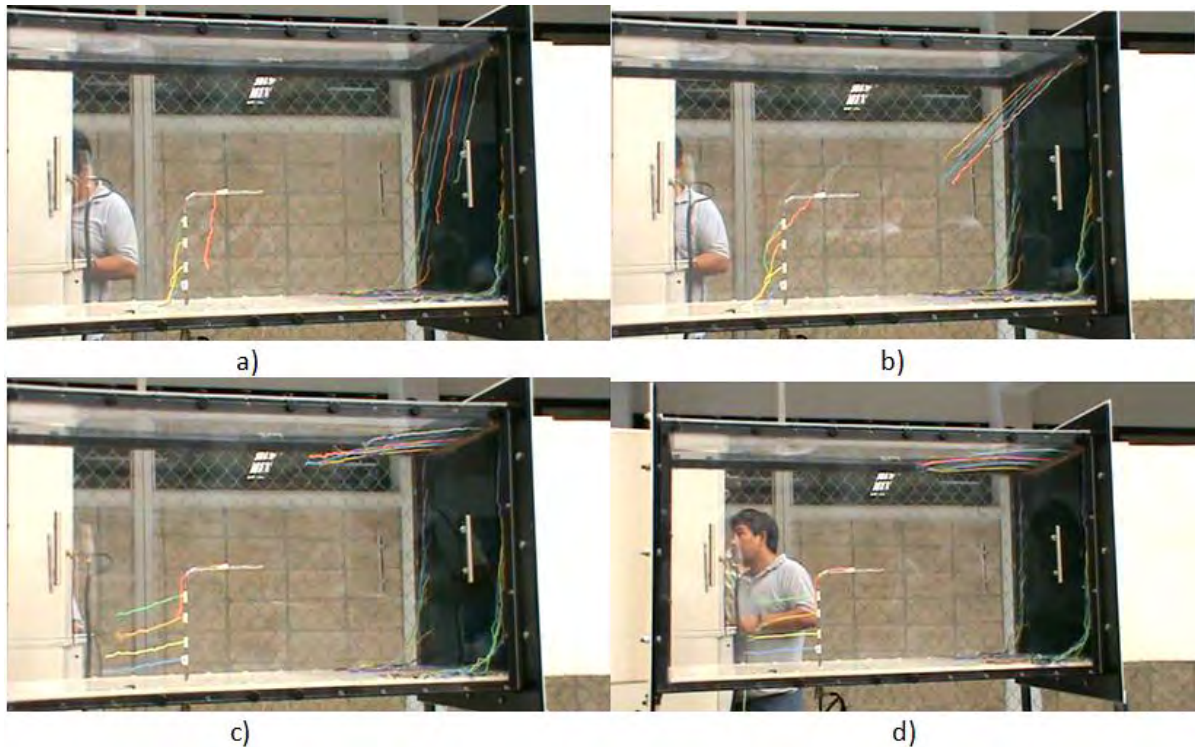


Figura 18. Segunda Prueba Visual con Hilos de Algodón Añadidos al Tubo de Pitot. a) Comienzo de la prueba a 1.5 Hz. b) Frecuencia del motor a 2.5 Hz, hilos de algodón superiores se levantaron aproximadamente en un ángulo de 45°. c) Frecuencia del motor a 7.5 Hz. d) Frecuencia del motor 15 Hz.

- a) Se comenzó la prueba a la misma frecuencia con 1.5 Hz, viéndose a través de los hilos de algodón que el flujo del aire pasa únicamente por el centro del área de la zona de prueba.
- b) Se incrementó la frecuencia a 2.5 Hz, generando el mismo comportamiento con los hilos del algodón de los costados, levantándose estos en un ángulo de aproximadamente de 45° como en la prueba anterior con la misma frecuencia; comienzan a elevarse los hilos de algodón del tubo de Pitot.
- c) Se elevó la frecuencia del motor a 7.5 Hz, observándose que el flujo del aire pasa por el centro sin problemas al menos por toda el área de la altura del tubo de Pitot, el hilo

de algodón en la parte superior del tubo de Pitot, no reacciona al flujo del aire debido al efecto del fenómeno de capa límite.

- d) Por último en esta prueba, se incrementó la frecuencia a 15 Hz, efectivamente por el centro pasa casi uniforme el flujo del aire. Como se había dicho anteriormente por los costados del área de la entrada de la zona de pruebas, existe el fenómeno de capa límite, por lo tanto el flujo del aire que pasa por ahí es turbulento. Al igual que en la prueba anterior, el hilo de algodón en la parte superior del tubo de Pitot sufre del efecto del fenómeno de capa límite.

Tercera Parte

En la tercer y última parte de las pruebas visuales se le anexo una extensión vertical al tubo de Pitot con dos hilos de algodón, para observar el comportamiento del flujo del aire en esa zona.

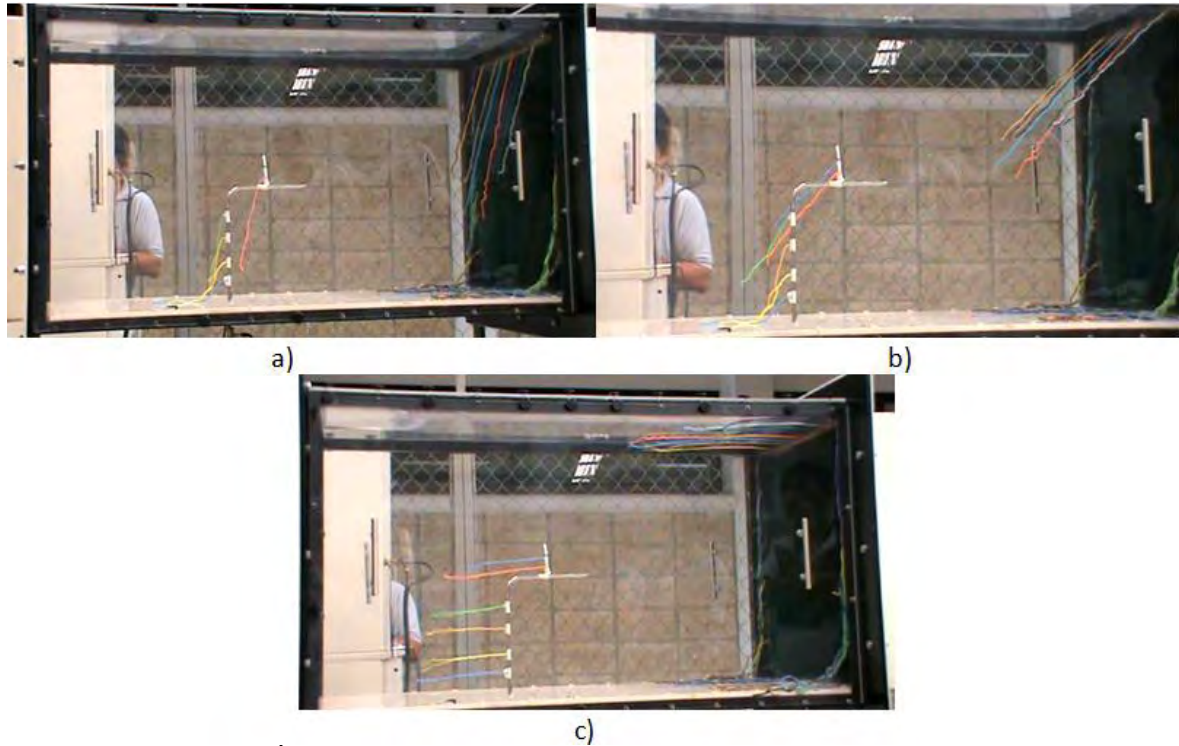


Figura 19. Tercer y Última Prueba Visual con Hilos de Algodón Añadiéndole una Extensión Vertical al Tubo de Pitot. a) Comienzo del Movimiento a 1.5 Hz. b) Frecuencia del Motor a 2.5 Hz, Hilos de Algodón de la parte superior se levantan aproximadamente en un ángulo de 45°. c) Frecuencia del Motor a 12.5 Hz, Todos los Hilos del Centro se Levantaron Casi de Manera Uniforme.

- a) Se inició la prueba con una frecuencia de 1.5 Hz, los hilos de algodón apenas empezaron a reaccionar con el flujo del aire.
- b) Se incrementó la frecuencia del motor a 2.5 Hz como en las anteriores pruebas, los hilos de algodón comienzan a levantarse aproximadamente en un ángulo de 45°.
- c) Se elevó la frecuencia del motor a 12.5 Hz. los hilos de algodón del tubo de Pitot y de la extensión añadida, se levantaron de manera casi uniforme, dando por hecho que el flujo del aire por el centro de la cámara de pruebas es casi estable. Reiterando, los hilos de algodón de la parte superior del área de la entrada de la zona de prueba, se

levantan porque están colgados en caída libre, sufriendo el efecto de la turbulencia por las cejas.

Estas tres pruebas visuales con hilos de algodón, sirvieron para diagnosticar el estado del túnel de viento. Quedando claro que por los costados el flujo del aire es afectado por el efecto del fenómeno de capa límite, ya que estos bordes generan turbulencia en el flujo del aire al chocar con estos.

Posteriormente a esto, se hicieron algunas adecuaciones al túnel de viento, con el fin de tener una mayor área de trabajo.

Modificación al Túnel de Viento, Primera Parte

Una vez hecha la prueba visual con los hilos atados en los costados del área de entrada a la zona de prueba, y en el tubo de Pitot, se tomaron las medidas pertinentes para trabajar en su modificación.

Las modificaciones⁵ realizadas al túnel de viento se dividieron en dos partes:

- Modificación de las cejas de unión de la zona de:
 - a) Contracción con la Cámara de Pruebas,
 - b) Descarga con la Cámara de Pruebas.

Con la finalidad de tener una superficie sin bordes y evitar turbulencia.

- Reubicación del Motor Eléctrico en su Nueva Base.

Se reubicó el motor a una posición en la que se obtuvo una pequeña reducción de las vibraciones ocasionadas por su funcionamiento

⁵ Modificaciones hechas por personal del taller de ingenierías de la UQROO.

Modificación de la Unión Entre la Zona de Pruebas y la Zona de Contracción

Para empezar con su mejoramiento del túnel de viento de la UQROO de área de trabajo de $60 \times 62 \text{ cm}^2$, Lo *primero* que se le modificó al túnel de viento fueron dos cosas, retirarle los bordes (cejas) de conexión entre la zona de contracción y la cámara de pruebas, y retirarle los bordes (cejas) de conexión entre la cámara de pruebas y la zona de descarga.

Se determinó que las cejas o bordes entre la zona de contracción y la cámara de pruebas se tenían que retirar, y así la turbulencia del flujo del aire generada por el choque del flujo del aire con los bordes se iría. El área de la entrada a la zona de prueba mejoró.

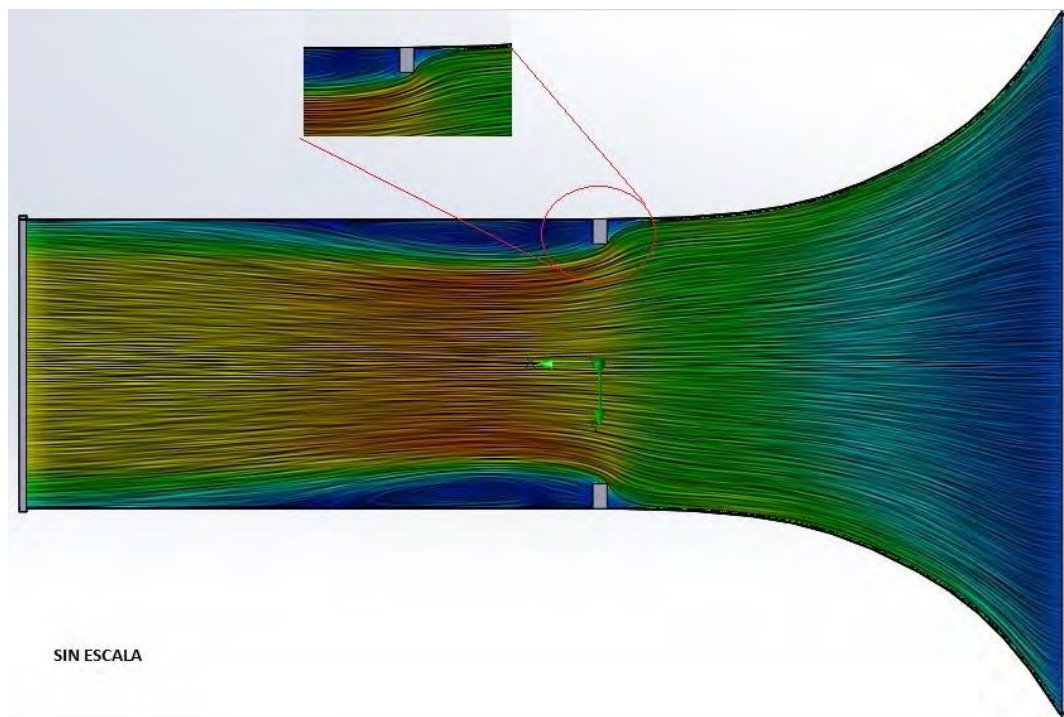


Figura 20. *Torbellinos de Flujo del Aire Generado por la Unión en la Cámara de Pruebas y la Zona de Contracción.*



Figura 21. Cejas o bordes entre la zona de contracción y la cámara de pruebas.

Modificación de la Unión Entre la Zona de Pruebas y la Zona de Descarga

Se retiró de igual manera, una malla o rejilla soldada de metal, la cual se encontraba entre la conexión de la cámara de pruebas y la zona de descarga. Esta rejilla servía para evitar que algún objeto sólido lo absorbiera el ventilador, y este pudiera dañarse. Se retiró debido a que el flujo del aire de igual manera chocaba con las pestañas, independientemente la malla, se generaba turbulencia en el flujo del aire por todos los bordes del área de la salida de la cámara de pruebas.



MALLA METÁLICA

Figura 22. Malla o rejilla entre la zona de descarga y la cámara de pruebas.

Reubicación del Motor Eléctrico en su Nueva Base

La *segunda* modificación realizada al túnel de viento fue reubicar el motor, debido a que se encontraba directamente sobre la estructura donde se aloja la flecha del ventilador y su polea. Fue por este motivo que se reubicó a un costado, junto con su nueva base, la cual se fabricó en el taller de ingenierías de la UQROO.

Antes de la Reubicación del Motor del Túnel de Viento



Figura 23. Motor del Túnel de Viento en su Base de Fábrica.

Se aprecia en la figura 23, el motor como venía de fábrica, y su respectiva polea, estos se encontraban en la misma base de la flecha del ventilador y su polea.

Debido a que el motor eléctrico tiene mucha potencia, vibra muy fuerte conforme se le aumenta la frecuencia. Por este motivo, se reubicó el motor a un costado, haciéndole su propia base en la que se obtuviera una reducción de las vibraciones ocasionadas por su funcionamiento.



Figura 24. Túnel de Viento de Fábrica.

En esta figura aún se puede apreciar el túnel viento como llegó de fábrica. Cuenta con su tablero y gabinete de control e instrumentación. El ducto que sobresale de la cámara del ventilador se retiró, esto debido a que solo es una ruta de descarga de aire. En vez de salir el flujo del aire al exterior horizontalmente, ahora sale al exterior verticalmente.



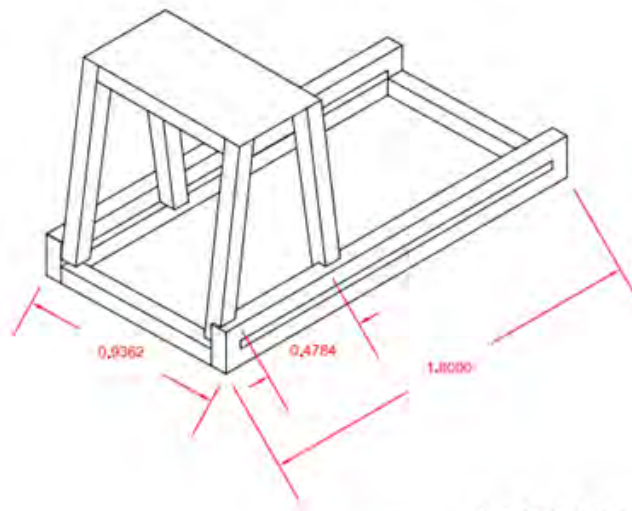
Figura 25. Zona de Acondicionamiento del Túnel de Viento de Fábrica.

Se observa en esta figura el filtro de guata blanca de la entrada de la zona de acondicionamiento. Este funciona como cualquier filtro, evita que cualquier suciedad sólida, ingrese al interior de la cámara de pruebas.

Después de la Reubicación del Motor del Túnel de Viento

Posteriormente al diagnóstico previo del estado del túnel de viento, se determinó diseñar una nueva base al motor, a un costado de la flecha del ventilador. Esto con la intención de reubicar el motor a una posición en la que se obtuviera una reducción de las vibraciones ocasionadas por su funcionamiento.

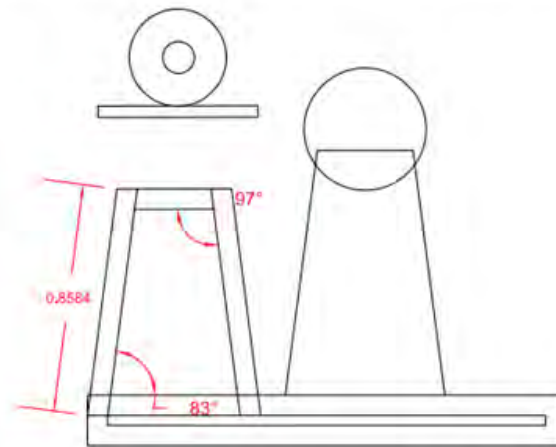
NUEVA BASE DEL MOTOR



Escala (m): 1:1

Figura 26. Vista en Perspectiva de la Nueva Base del Motor.

BASE DEL MOTOR TÚNEL DE VIENTO Y BASE DE LA FLECHA DEL VENTILADOR



Escala (m): 1:1

Figura 27. Vista Frontal de la Base: del Motor y de la Flecha del Ventilador.



Figura 28. Motor en su Nueva Base.

En la figura 28 se muestra la modificación realizada de la nueva ubicación del motor en el túnel de viento. Se creía con esto que, separando el motor a un costado de la base de la flecha del ventilador se disminuiría la vibración que transmite éste a toda la estructura, sin embargo no fue así. La disminución de la vibración fue mínima. Se propone mejor reubicar el motor fuera de la estructura, para que así éste, no transmita ningún tipo de vibración hacia el túnel de viento.

Modificación al Túnel de Viento, Segunda Parte

La segunda parte de las modificaciones que se realizaron al túnel de viento, consistió en darle continuidad a lo que se venía haciendo anteriormente, que a fin de cuentas es disminuir la vibración. Entre la base del motor y el motor existía una junta de caucho de cámara de llanta, la cual era ineficiente, debido a que no absorbía de ninguna manera la vibración, por lo que fue sustituida por una junta de caucho de llanta de automóvil. Otro problema fue que la polea de la flecha del ventilador tenía un desbalance bastante considerable, el cual de igual manera, provocaba vibración y la transmitía a la flecha del ventilador; se llevó al torno para a encasquillar

el diámetro interior. Para concluir con las modificaciones de esta segunda parte, lo último que se hizo fue alinear la polea del motor con la polea de la flecha del ventilador, ya que de igual forma provocaba vibración su desalineación.

A continuación en las figuras 29, 30 y 31, se presenta todo el proceso de la sustitución de las juntas de la base del motor. Estas nuevas juntas fueron hechas de llanta de caucho de automóvil reciclada por sus propiedades de absorción de impactos.

Primero, con la ayuda de un esmeril angular, se cortaron los pedazos de llanta de caucho lo suficientemente grandes para hacer las juntas o empaques.



Figura 29. Llanta Reciclada Para las Nuevas Juntas.

Como se ha dicho anteriormente se utilizó material reciclado, para reemplazar los empaques o juntas de caucho de cámara que había entre la base del motor y el motor. Los nuevos empaques o juntas son de caucho de llanta de automóvil.

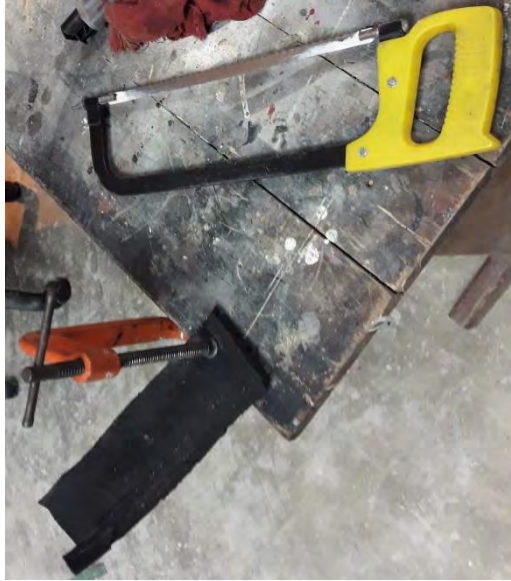


Figura 30. Corte del Tamaño de las Nuevas Juntas.

Una vez cortado los tamaños adecuados para las nuevas juntas, con una segueta y una prensa tipo “C” se les dio forma de junta, como se puede ver en la figura 30.



Figura 31. Fabricación de los orificios de las juntas para los nuevos tornillos.

Posteriormente se le hicieron los orificios en el torno de banco, donde se alojarían los nuevos tornillos que unen la base del motor con el motor.

También se detectó un desbalance en la polea de la flecha del ventilador, al momento de incrementar la frecuencia del motor eléctrico, la polea giraba de una forma poco común, por lo que con el apoyo de una escuadra con nivel se observó que la polea tenía una holgura considerable, que provocaba vibración en la estructura. Se requirió la opinión de un experto, un “maestro del torno” que confirmó el daño de la polea. Todo el diámetro interior debía ser encasquillado, es decir al diámetro interior de la polea, se le introdujo un buje para recobrar el espesor adecuado y eliminar la holgura. Posteriormente la desmontó, la reparó en su taller de tornería, y la montó nuevamente. Hecha ésta reparación, se redujo al menos la vibración que ésta le transmitía a la estructura del túnel de viento.

A continuación en la figura 32, 33 y 34, se presenta el trabajo que se realizó con la polea de la flecha del ventilador.



Figura 32. Vernier Para Medir el Diámetro Interior de la Polea de la Flecha del Ventilador.

Se utilizó un *Vernier* para medir el diámetro: exterior de la flecha del ventilador, e interior de la polea del ventilador. La holgura después de encasquillar la polea de la flecha del ventilador fue menor a 0.5 mm, lo cual es aceptable para evitar deslizamiento relativo y reducir vibraciones.



Figura 33. Proceso de Encasquillado de la Polea de la Flecha del Ventilador en el Torno.

En la figura 33 se observa al “maestro tornero” operando el torno utilizado para encasquillar el diámetro interior de la polea de la flecha del ventilador.



Figura 34. Polea de la Flecha del Ventilador, Encasquillada y Montada.

Una vez colocada la polea del ventilador, se tuvo que alinear con la polea del motor, para lo cual se utilizó: una piola, un nivel de medición, una escuadra, así como una garrucha para mover el motor con facilidad. En la Figura 35 se muestra el procedimiento de la alineación de poleas que se realizó. Finalmente, tanto como la flecha del ventilador como también la polea, necesitan una cuña opresora para evitar que se deslice ésta hacia algún lado y se pierda la alineación.



Figura 35. Alineación Entre las Poleas de: la Flecha del Ventilador y la del Motor. a) Se Utilizó una Piola y un Nivel de Medición de 200 cm Para Alinear b) Rieles de la Base Donde se Mueve el Motor. c) Garrucha Utilizada Para Mover el Motor. d) Poleas Finalmente Alineadas.

Se utilizó una garrucha como se ve la figura 35 c) para poder mover el pesado motor, ésta se sujetó en una columna la cual funcionó como ancla para tirar, para que no se dañara el motor con el cable de la garrucha se le colocó cartón a éste y a la columna calces de madera para que

también no se resquebraje. Posteriormente, se aflojaron las contratuercas de los tornillos para poder mover el pesado motor por los canales o rieles del motor que se pueden observar en la figura 35 b). Después se utilizó una piola y un nivel de medición, para alinear las poleas de: la flecha del ventilador y la del motor, para que finalmente sujetemos los tornillos de la base del motor y quede todo fijamente en su lugar, viéndose esto en la figura 35 a).

En la figura 35 d) se aprecian las poleas perfectamente alineadas, su función de éstas es transmitir el movimiento del motor eléctrico a la flecha del ventilador de la manera más eficiente posible.

Capítulo IV

Adecuaciones Para Realizar la Caracterización del Flujo del Túnel de Viento

En este capítulo se describe cómo se adecuó la zona de pruebas para la realización de la caracterización del flujo del túnel de viento.

Como primer objetivo era instalar 5 varillas (A, B, C, D y E) a una distancia determinada, separadas simétricamente para obtener al final un plano de medición. Se hicieron 5 orificios con taladro en la tapa de acrílico superior de la zona de prueba, todos éstos a una distancia de la entrada a la zona de pruebas de 52 cm; en la figura 36 se observan las distancias de cada varilla a la pared.

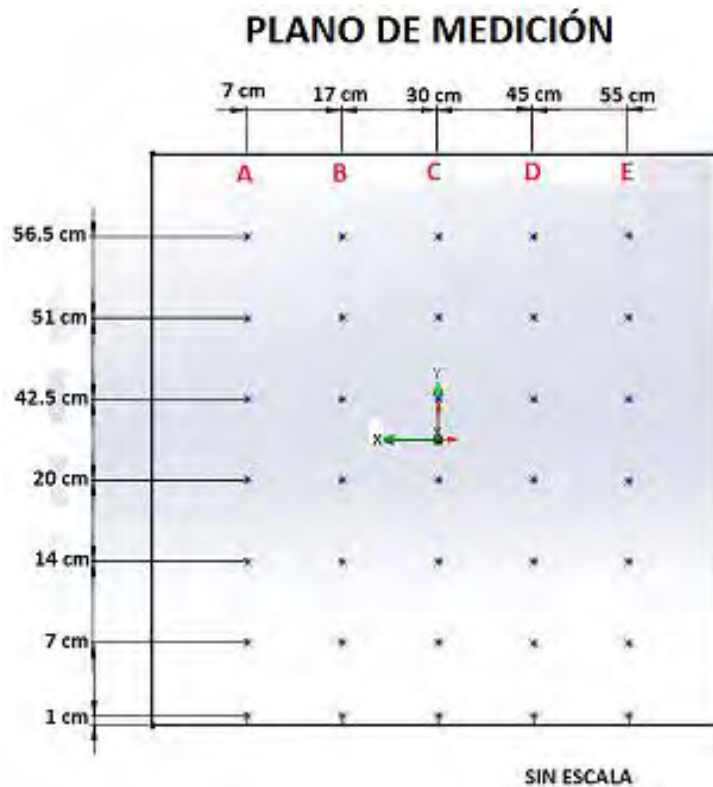


Figura 36. Plano de Medición.



Figura 37. Varillas A, B, C, D y E Colocadas en la Zona de Pruebas.

Posteriormente se rehabilito un banco de manómetros casero que se encontraba en el taller de ingenierías de la UQROO, únicamente se le dio mantenimiento, se le adaptaron dos reglas de medición, y se le agregó colorante rojo natural, esto para observar mejor los cambios de altura de columna de agua.



Figura 38. Instalación del banco de manómetro casero fabricado en la UQROO.

Finalmente el túnel de viento se encuentra en condiciones de operar, únicamente falta instalar el tubo de Pitot en cualquier varilla donde se desee trabajar, es decir, como dice el **capítulo II**, éste medirá la diferencia de presiones; trabajando en conjunto con el manómetro, nos proporcionará información como: la altura de columna de agua A (presión dinámica), que nos servirá para obtener posteriormente la velocidad del flujo del aire que pasa a través del punto en el plano de medición donde lo coloquemos, todo dependerá de la frecuencia que se maneje. De igual manera nos proporcionará la altura de columna de agua B (Presión Estática).



Figura 39. Ejemplo, Tubo de Pitot Instalado en la Varilla "A".

Capítulo V

Resultados y Análisis de Resultados

Pruebas al Túnel de Viento

Consisten en tres pruebas similares que se realizaron en el plano de medición antes descrito en el **capítulo IV**, simplemente éstas pruebas son una caracterización del flujo de aire que pasa a través de la zona de pruebas. Ésta se realiza para observar el comportamiento del flujo del aire en la zona donde se trabaja con el tubo de Pitot.

Gráficas en Excel

Con las tablas ya terminadas, se continuó ahora bien con graficar, para tener una mejor perspectiva del fenómeno que se presenta en el plano de medición en la zona de pruebas visto éste en la figura 40. En estas gráficas se representa la frecuencia del motor con respecto a la velocidad del flujo del aire respectivamente por cada varilla.

Finalmente se muestran las tres pruebas juntas en una gráfica comparativa. Esto se realizó de igual forma, con el objetivo de visualizar el comportamiento del flujo de aire de las tres pruebas juntas que atraviesa el plano de medición en la zona de prueba.

Se observa en cada una de las gráficas las posiciones en que fue colocado el tubo de Pitot en cada varilla, esperando que sigan todos los puntos su línea de tendencia, idealmente se espera que al aumentar la frecuencia, tiene que aumentar la velocidad proporcionalmente.

Solamente se manejaron las posiciones de: 7, 14, y 20 cm, ya que eran las únicas posiciones en común en todas las gráficas. Se consideró asignar como línea de tendencia a la posición intermedia de 14 cm.

Primer Prueba

El objetivo de esta prueba fue medir el flujo del aire que pasa a través del tubo de Pitot en 6 puntos separados simétricamente en cada varilla, se capturaron los datos en las tablas: 3, 4, 5, 6, y 7 expuestas en el **capítulo IX**, para posteriormente graficar éstos, y finalmente hacer un análisis del comportamiento del flujo del aire en el plano de medición. Esta prueba se utilizará para compararla con las siguientes dos pruebas.

La prueba consiste: en 5 varillas: “A”, “B”, “C”, “D”, y “E”, las cuales están separadas simétricamente del costado izquierdo a: 7, 17, 30, 45 y 55 cm respectivamente.

Los puntos en la varilla donde se colocó el tubo de Pitot que se manejaron en ésta primer prueba fueron en: 7 cm, 14 cm, 20 cm, 42.5 cm, 51 cm, y 56.5 cm. A continuación en la figura 40 se observa ésta distribución antes mencionada.

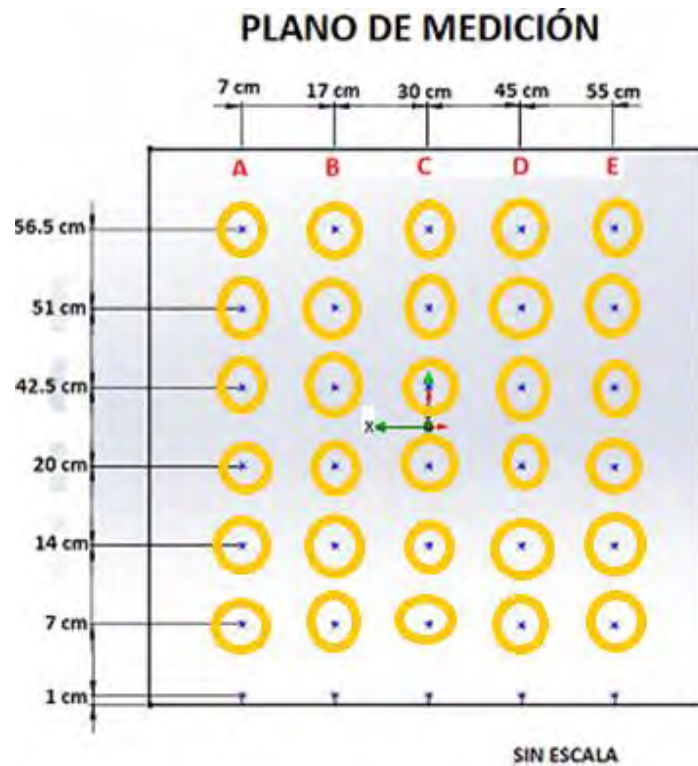


Figura 40. Puntos de Trabajo en el Plano de Medición.

Únicamente se consideraron los datos de las frecuencias de: 5, 10, 15, 20, 25, y 30⁶ Hz, para recortar los datos y que sean más fácil de manejar, aunque entre más datos existan más precisos serán los resultados. Las frecuencias que se habían manejado eran: 0.05 Hz, 1, 2, 3 a 33 Hz, aumentando la frecuencia de 1 Hz en 1 Hz.

El tubo de Pitot cuenta con dos mangueras, una indica la presión dinámica, y la otra indica la presión estática. Se conectaron las mangueras al banco de manómetros y se obtuvieron las alturas de columna de agua: “A” (Presión Dinámica) y “B” (Presión Estática)⁷. Posteriormente estos datos fueron graficados para analizarlos.

En la figura 40, se resalta con “círculos” amarillos los puntos donde se colocó el tubo de Pitot, para trabajar. En total se registraron en esta primer prueba: 180 mediciones, es decir 36 mediciones por varilla.

Cabe mencionar que, esta primer prueba sirvió como punto de partida para realizar las siguientes dos pruebas que se hicieron después. Posteriormente, se analizó el proceso de esta prueba para afinar detalles para la segunda prueba.

A continuación en la figura 41 se presenta la forma en que se variaron las alturas del tubo de Pitot. En este caso se encuentra en la varilla “D”, y a una altura de 20 cm. En este punto se tomaron 6 mediciones, como en todos los demás puntos.

⁶ Se considera que a 30 Hz aún es confiable la medición. Al incrementar la frecuencia más allá de 30 Hz se considera que la vibración es más fuerte, moviendo descontroladamente la estructura del túnel de viento y por lo tanto se desprecian estas pruebas.

⁷ Se desprecian las mediciones de la columna de la altura de columna de agua (estática), ya que son demasiado pequeñas.



Figura 41. *Tubo de Pitot Instalado en la Varilla "D" a 20 cm.*

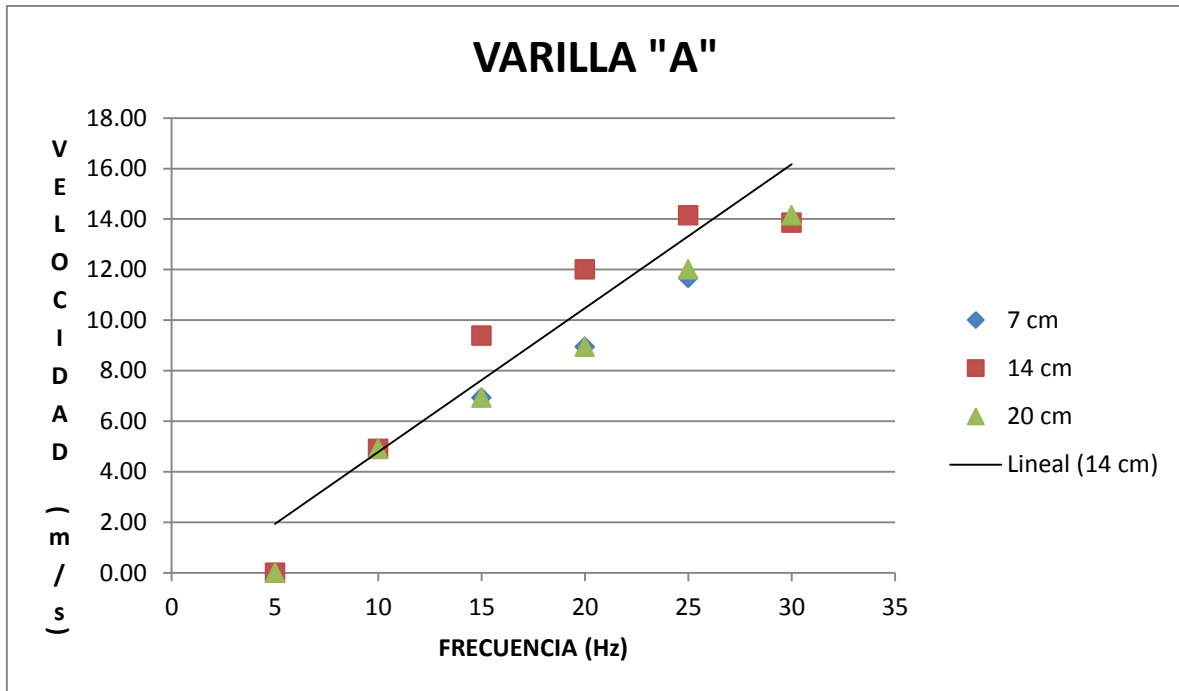
De igual forma en la figura 42 se presenta un ejemplo, donde el tubo de Pitot se encuentra en la varilla "D", motor a una frecuencia de 25 Hz, y a 14 cm del suelo de la zona de prueba, proporcionando una altura de columna de agua "A" (Dinámica) de: 0.8 cm y una altura de columna de agua "B" (Estática) de: 0.05 cm.



Figura 42. Varilla: "D", Frecuencia del motor: 25 Hz, y Altura: 14 cm, Altura de Columna de Agua: "A" (Dinámica) de 0.8 cm y "B" (Estática) de 0.05 cm.

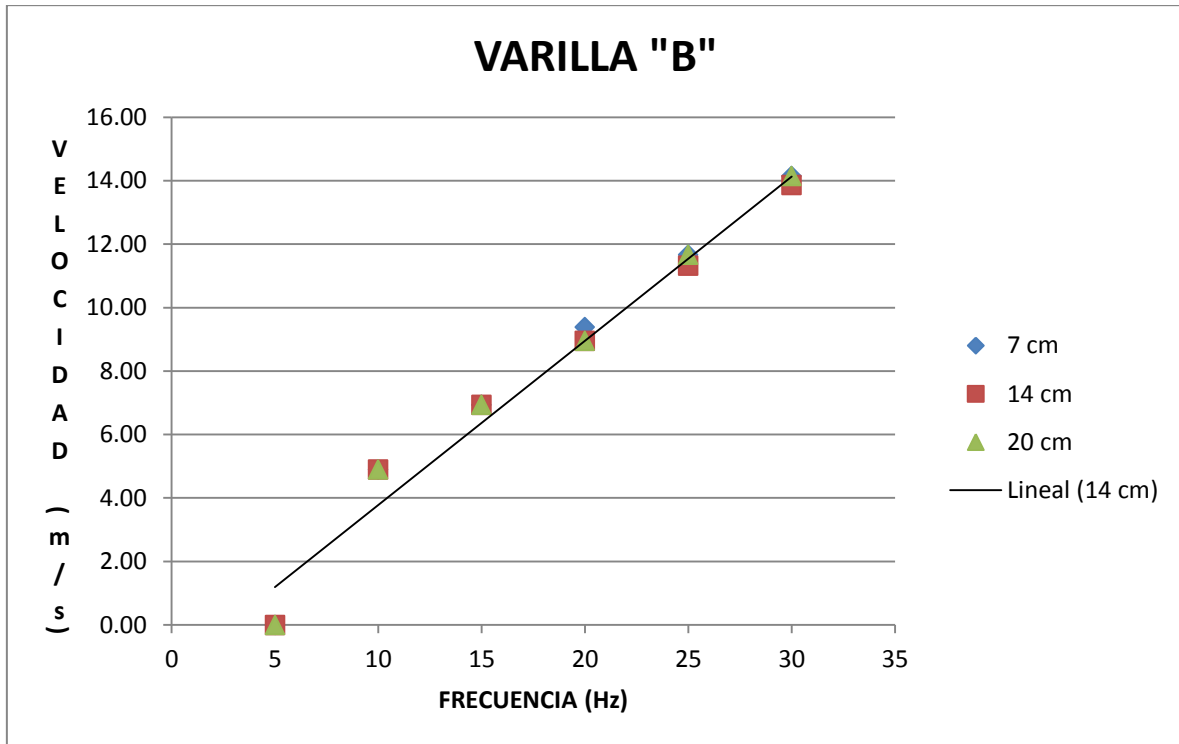
Gráficas en Excel, Primer Prueba.

Gráfica 1.
Varilla "A".



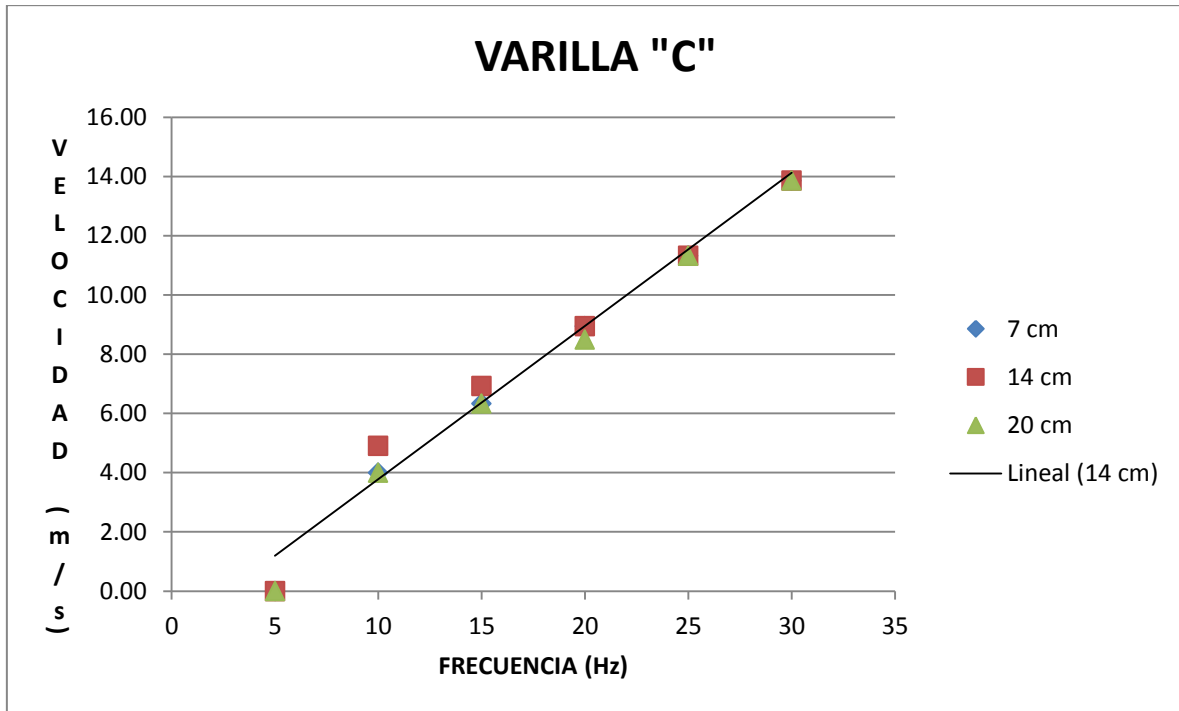
Se consigue visualizar en la gráfica que a 10 Hz el flujo del aire se comporta de manera uniforme, aunque al ir incrementando la frecuencia los puntos se dispersan, debido en parte por la turbulencia del flujo del aire generada por la vibración de la estructura.

Gráfica 2.
Varilla "B".



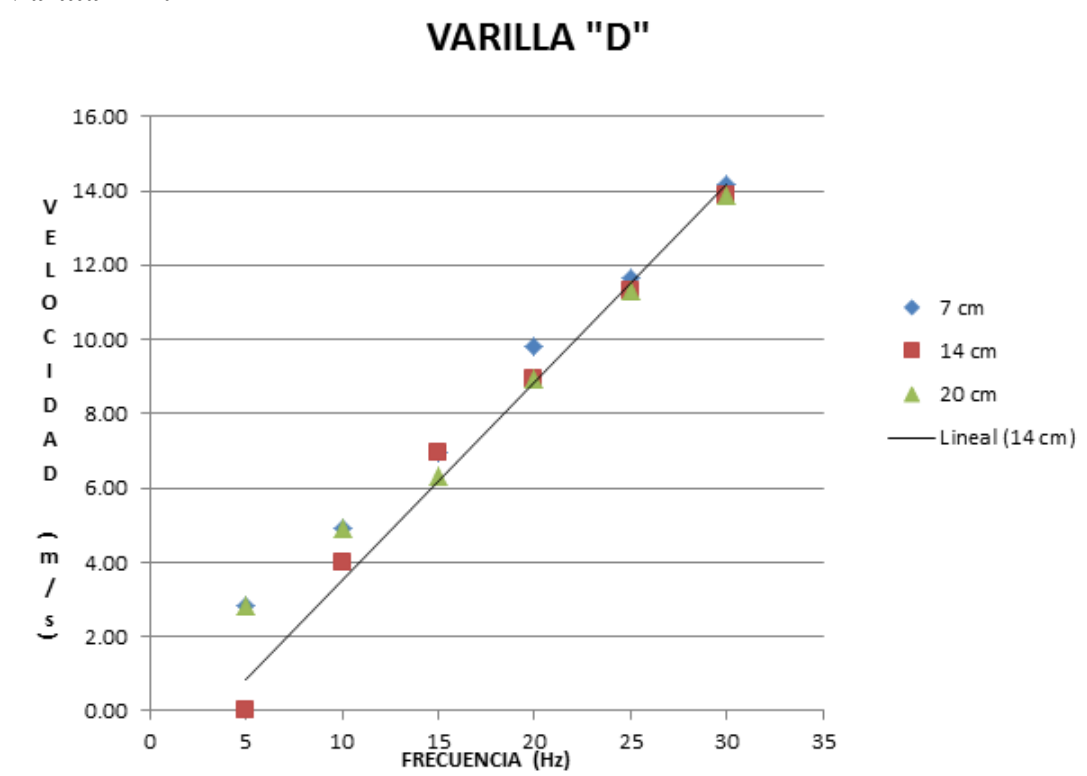
En la gráfica se consigue visualizar que el flujo del aire se encuentra estable, su tendencia es uniforme. Conforme aumenta la frecuencia, aumenta la velocidad proporcionalmente. Aunque, en algún momento, se presentará la inestabilidad de la estructura, provocada por la vibración que el motor y el ventilador emiten a la estructura del túnel de viento.

Gráfica 3.
Varilla "C".



Al igual que en la gráfica de la varilla "B", se consigue apreciar en la gráfica "C" que existe buena estabilidad del flujo del aire, la tendencia del flujo del aire es uniforme. Conforme aumenta la frecuencia del motor, aumenta la velocidad proporcionalmente.

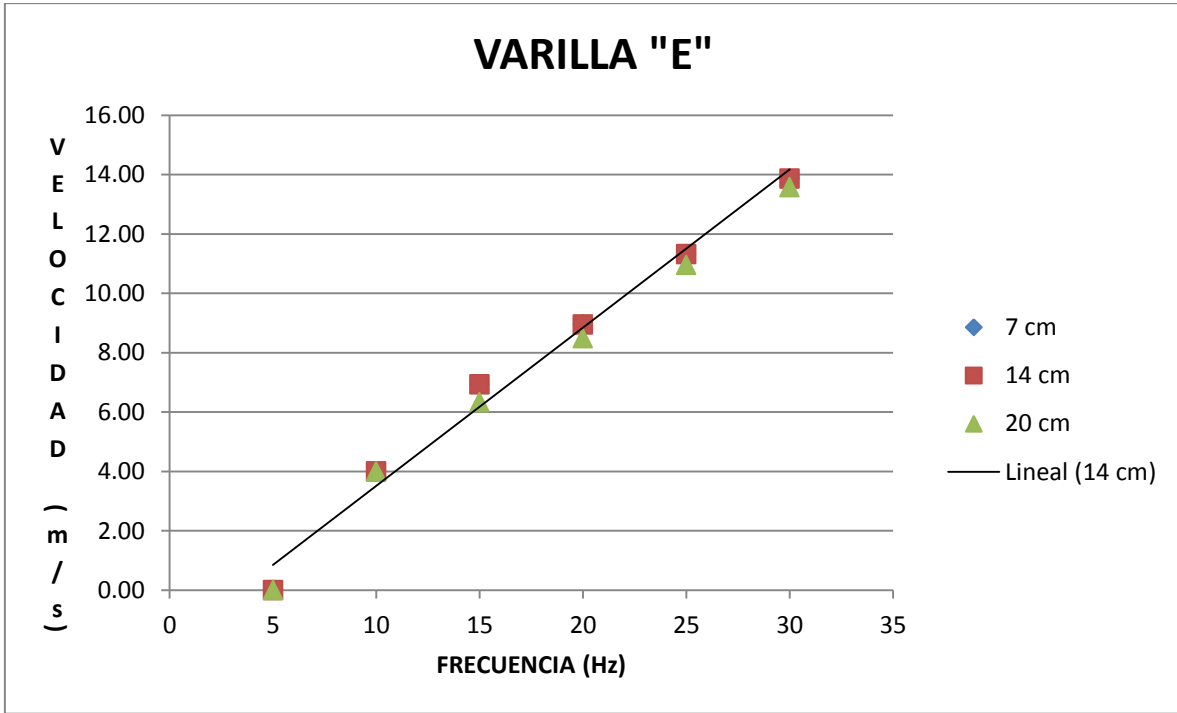
Gráfica 4.
Varilla "D".



En el inicio de esta gráfica se presentó la inestabilidad del flujo del aire, aunque conforme se aumentaba la frecuencia del motor se estabilizaba, a partir de los 25 Hz el flujo del aire fue uniforme.

A la frecuencia del motor de 15 Hz se estabiliza el flujo del aire de la altura del tubo de Pitot de 20 cm del suelo de la zona de prueba, excepto las alturas de 7 y 14 cm, estas alturas de 14 y 20 cm llegan a estabilizarse de 20 a 30 Hz.

Gráfica 5.
Varilla "E".



Se consigue visualizar en esta gráfica, que en todas las posiciones, en la varilla existe buena estabilidad del flujo del aire, su tendencia es uniforme. Conforme aumenta la frecuencia, aumenta la velocidad proporcionalmente.

Analizando las tablas de ésta primer prueba ubicadas en el **capítulo IX**. Iniciando con la varilla "A", donde casi todas las frecuencias coinciden que en la altura de 51 cm (eje "y") es donde se registra la mayor o igual medición de la altura de columna de agua (dinámica) en la varilla. En la varilla "B" y "D" a la altura de 7 cm del suelo de la zona de prueba, es donde se mantiene constante o es el mayor registro de la altura de columna de agua (dinámica), excepto a 51 cm del suelo de la zona de prueba en la varilla "B", a 5 Hz registra la mayor medición. En la

varilla “C” y “E” a la altura de 42.5 cm del suelo de la zona de prueba, es donde se mantiene como la mayor o misma medición de la altura de columna de agua.

Segunda Prueba

Una vez realizada la primer prueba, se toman sus resultados como punto de comparación con los que se obtendrán en ésta segunda prueba. A esta prueba únicamente se le anexó el accesorio e instrumento del túnel de viento llamado hilo caliente, solamente para hacer mediciones con éste instrumento, el cual mide la velocidad del flujo del aire, descrito anteriormente en el **capítulo II**.

Esta segunda prueba consiste en realizar 120 mediciones, las frecuencias del motor siguen siendo las estándares, dando un total de 24 mediciones por varilla. De la misma manera, las posiciones donde se colocó el tubo de Pitot en la varilla son las estándares, aunque solamente para las dos últimas pruebas, las cuales fueron: 1, 7, 14 y 20 cm. Se da inicio con la posición de 1 cm del nivel del suelo de la zona de prueba, con el fin de observar el comportamiento del flujo del aire aproximadamente a nivel de suelo de la zona de prueba. Los datos capturados se encuentran en las tablas ubicadas al final, en el **capítulo IX**. Los datos capturados fueron: la altura de columna de agua “A” (dinámica), las velocidades del hilo caliente “B”, y la velocidad que se calculó a partir de los datos de la altura de columna de agua “A”.

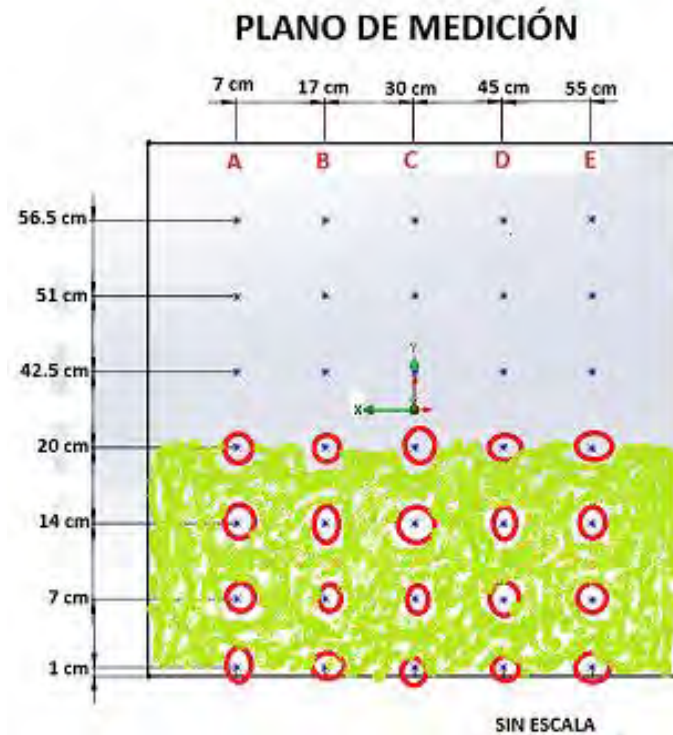


Figura 43. Segunda Prueba, Plano de Medición.

En la figura 43, se consigue observar las posiciones en las que se colocó el tubo de Pitot, los cuales se encuentran resaltados en un “círculo” rojo. De igual forma, se resalta con color verde la zona en el plano de medición en la que se trabajó y trabajará de igual manera en la tercer y última prueba.

A continuación se presentan las fórmulas 10 y 11, para calcular la velocidad del flujo del aire a partir de los datos de la altura de columna de agua (dinámica):

$$v = \left[\frac{(2)(P_{Din})}{\rho_{aire}} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$P_{Din} = [A.C.A.D][\gamma_{H_2O}] \quad (11)$$

Donde:

v : Velocidad,

P_{Din} : Presión Dinámica,

ρ_{aire} : Densidad del aire= 1.22 kg/m³ a 30°C,

γ_{H_2O} : Peso Específico del Agua= 9.77 kN/m³ a 30°C, y

$A.C.A._D$: Altura de Columna de Agua (Dinámica).

A continuación en la figura 44, se presenta un ejemplo de las varias formas en las que se colocó el tubo de Pitot en el plano de medición. En este caso se encuentra en la varilla “D”, a una altura del suelo de la zona de prueba de 20 cm, y el hilo caliente se encuentra en el orificio “A”. De igual forma en la figura 45, se muestra el manómetro, donde el tubo de Pitot se encuentra en la varilla “D”, con una frecuencia de motor de 25 Hz y a 14 cm del suelo de la zona de prueba; dando una medición de altura de columna de agua “A” (dinámica): de 1.15 cm y el hilo caliente “B”: una velocidad de 19.9 m/s.



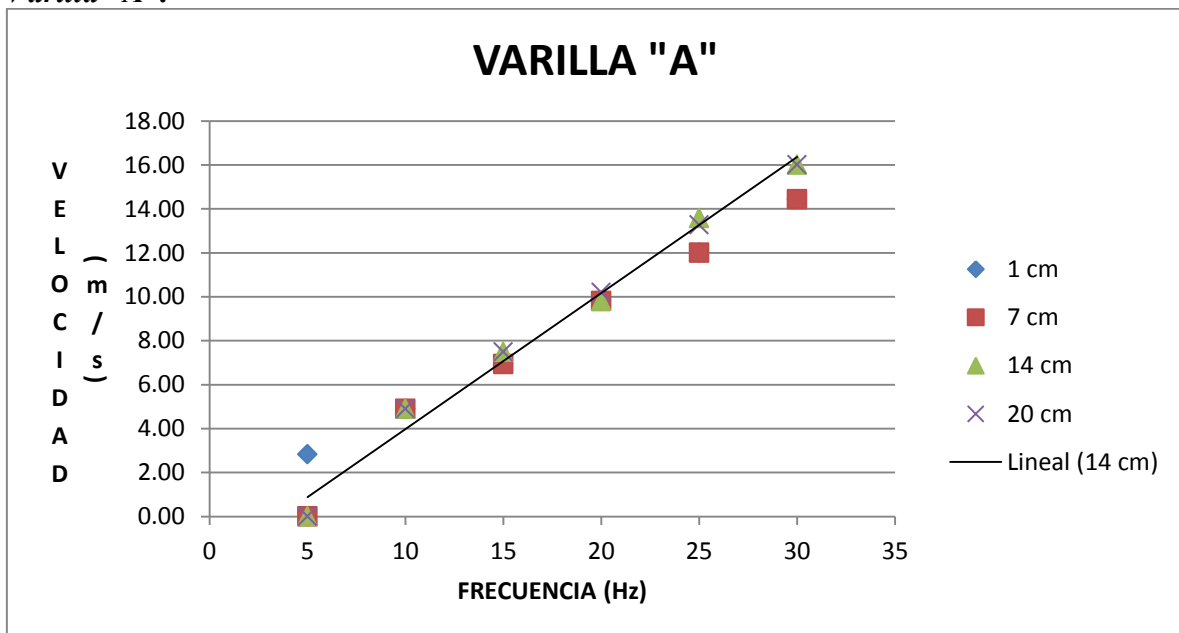
Figura 44. Tubo de Pitot Colocado en la Varilla "D" a 20 cm del Suelo de la Zona de Pruebas e Hilo Caliente Colocado en el Orificio "A".



Figura 45. Varilla “D”. Frecuencia de Motor de 25 Hz. Tubo de Pitot Colocado a 14 cm del Suelo de la Zona de Pruebas. Altura de Columna de Agua “A” (Dinámica): 1.15 cm. Hilo Caliente “B”: 19.9 m/s.

Graficas en Excel, Segunda Prueba.

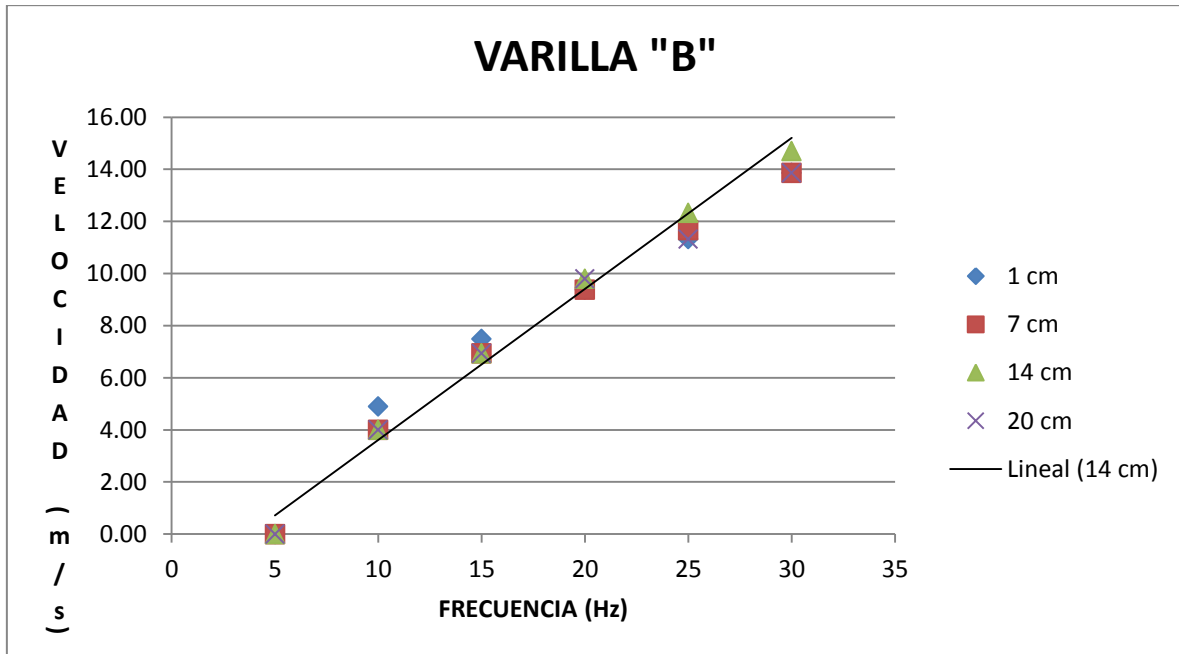
Gráfica 6.
Varilla “A”.



Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

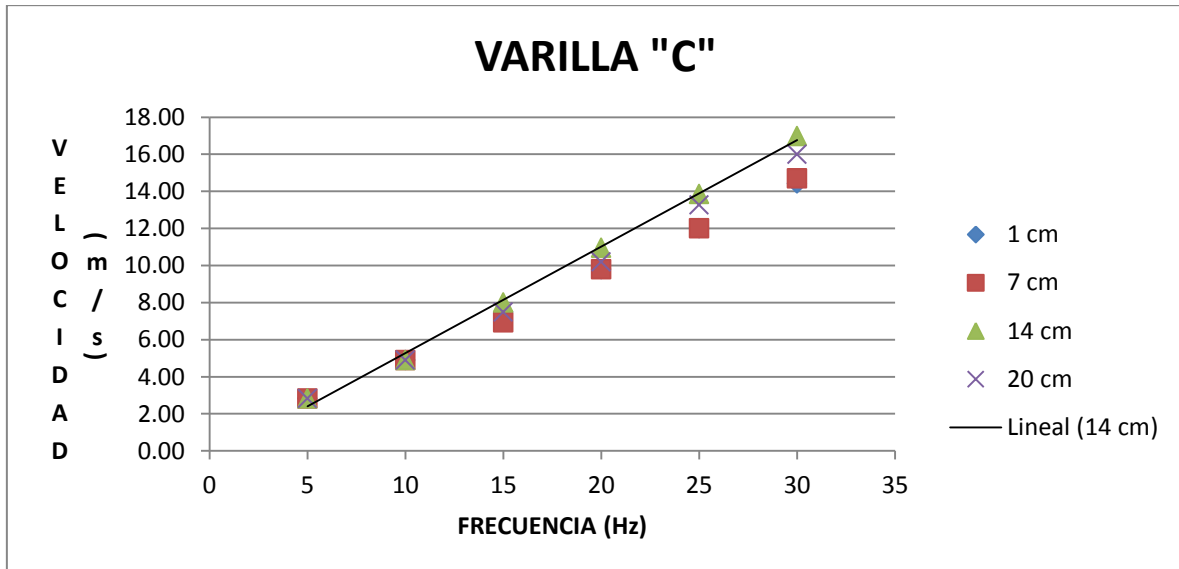
Se consigue visualizar en la gráfica que, iniciando la prueba la inestabilidad del flujo del aire está presente, pero conforme se va incrementando la frecuencia del motor se va estabilizando el flujo del aire. De todas las pruebas, únicamente de la frecuencia del motor de 15 a 25 Hz, existe uniformidad del flujo del aire. Solamente continúa así, en las posiciones del tubo de Pitot: 14 y 20 cm; pierde uniformidad el flujo del aire conforme aumenta la frecuencia del motor en las alturas del tubo de Pitot de 1 y 7 cm.

Gráfica 7.
Varilla "B".



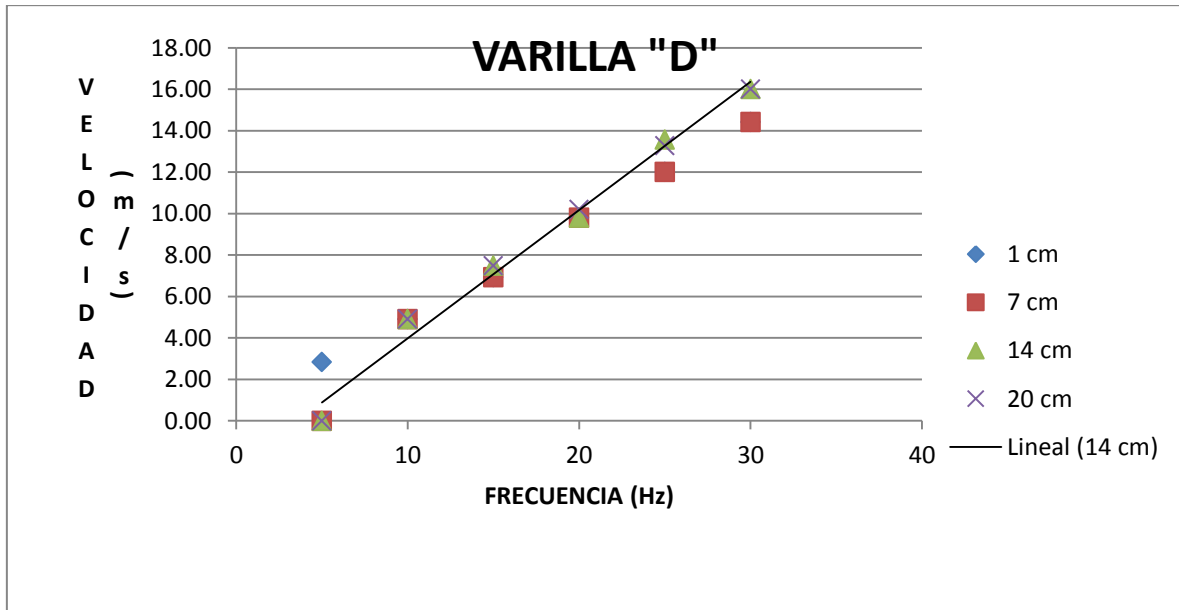
En general existe buena estabilidad del flujo del aire en la zona de prueba desde el comienzo hasta que llega a 25 Hz, esto es porque, conforme se va aumentando la frecuencia del motor aumenta la vibración de la estructura del túnel de viento, debido al motor y al ventilador, provocando inestabilidad del flujo del aire.

Gráfica 8.
Varilla "C".



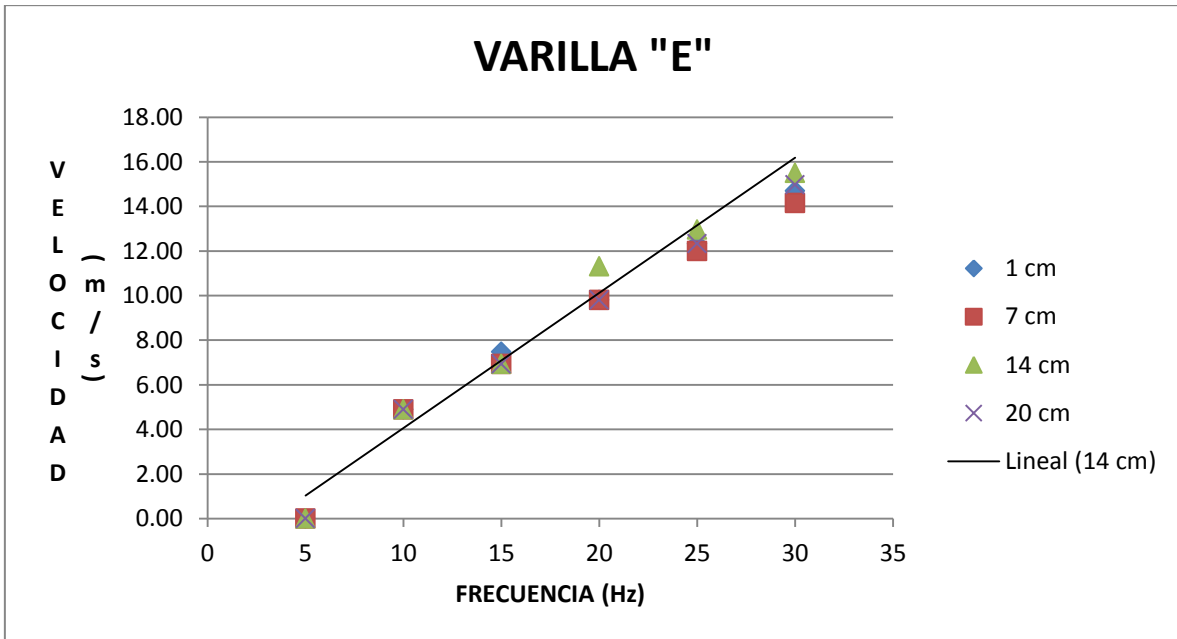
Inicia la prueba con estabilidad del flujo del aire, continua así hasta el final de la prueba en las posiciones en la varilla de: 14 y 20 cm del suelo de la zona de prueba; en 1 y 7 cm la tendencia es otra pero buena, aunque se hayan alejado de la tendencia base. Este fenómeno es generado por la vibración que le transmite el motor y el ventilador al incrementar la frecuencia. De igual forma, esto provoca que la varilla donde se encuentra instalado el tubo de Pitot vibre descontroladamente haciendo que las pruebas no sean confiables.

Gráfica 9.
Varilla "D".



Al inicio la inestabilidad es evidente, conforme aumenta la frecuencia el flujo del aire se va estabilizando, a partir de los 15 Hz el flujo del aire es estable hasta el final de la prueba en las posiciones: 14 y 20 en la varilla. Decae la estabilidad del flujo del aire en un poco menos de los 25 Hz en las alturas del Tubo de Pitot de 14 y 20 cm hasta el fin de la prueba.

Gráfica 10.
Varilla "E".



Es evidente la estabilidad del flujo del aire únicamente de 15 a 20 Hz. No obstante, al seguir incrementando la frecuencia del motor la vibración crece, propiciado que disminuya la estabilidad del flujo del aire.

De igual forma se analizan las tablas de la segunda prueba ubicadas en el **capítulo IX**:

Varilla "A".

Se mantiene el mismo o mayor registro en el manómetro en la posición del tubo de Pitot de 1 a 7 cm en la varilla. Excepto a 5 Hz, a la altura de 1 cm del nivel del suelo de la zona de prueba se registra la mayor altura de columna de agua (dinámica). En la columna de velocidad del flujo del aire, se observa que al menos, en la parte inferior de la zona de prueba,

Entre las posiciones del tubo de Pitot de 7 y 14 cm en la varilla, el hilo caliente, registra la mayor velocidad del flujo del aire.

Varilla "B".

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Con base a la velocidad obtenida con los datos de la altura de columna de agua (dinámica), de 5 a 15 Hz se mantiene uniformidad en el flujo del aire en las alturas del nivel de suelo de la zona de pruebas de 7 a 20 cm. De igual forma, de 14 a 20 cm del nivel de suelo de la zona de prueba se mantiene la uniformidad del flujo del aire de 20 a 30 Hz.

El Hilo Caliente nos dice que al menos a la altura del nivel de suelo de la zona de prueba de 14 cm a 20 cm, se mantiene con regularidad el flujo del aire.

Varilla “C”.

Transformando la medición de la altura de la columna de agua (dinámica) en velocidad con la ayuda de las fórmulas 10 y 11, de 5 a 10 Hz se mantiene la uniformidad del flujo del aire, y de 15 a 30 Hz la velocidad del flujo del aire se incrementa al menos en las alturas: 14 y 20 cm del nivel del suelo de la zona de prueba. La mayor velocidad del flujo del aire al menos se mantiene a 14 cm de altura del nivel de suelo de la zona prueba.

La mayor medición del hilo caliente de la velocidad del flujo del aire se registra, a la altura de 7 cm del nivel del suelo de la zona de prueba, y se mantiene para todas las frecuencias.

Varilla “D”.

En las 4 posiciones en la varilla donde se colocó el tubo de Pitot, el incremento del flujo del aire es uniforme en base a su comportamiento en los datos de la tabla 11. En general la prueba en ésta varilla es buena.

Varilla “E”.

Conforme a la tabla 12, al inicio de la prueba existe buena estabilidad, con base a la altura de columna de agua (dinámica) de 5 a 10 Hz. La altura de columna de agua (dinámica) más alta fue a la altura de 14 cm del suelo de la zona de prueba, a una frecuencia de motor de 20 Hz.

Con base al hilo caliente la velocidad más rápida fue a la altura de 7 cm. Excepto por una centésima es más veloz el aire a la altura de 20 cm, a una frecuencia de motor de 5 Hz.

En general, en esta segunda prueba, la varilla “D” fue la que mejor se comportó, esto es debido a que existe uniformidad en el flujo del aire al menos en el rango acordado para esta prueba.

Se concluye que al menos en la parte inferior de la zona de prueba, y sobre todo en la zona central, existe buena circulación de flujo del aire según las mediciones de la columna de velocidad y las del hilo caliente.

Tercer Prueba

Tercer y última prueba realizada al túnel de viento por parte de éste trabajo de tesis. Consistió en capturar los datos de la altura de columna de agua (dinámica) de cada varilla, y posteriormente usar las fórmulas 10 y 11 para obtener la velocidad del flujo del aire. Finalmente se graficó en Excel, para visualizar el fenómeno que se presenta en la zona del plano de medición que se muestra en la figura 43. Únicamente en esta prueba se graficó en línea en un mapa de contorno, para simular el comportamiento realista del flujo del aire en las zonas del plano de medición.

Las dos primeras pruebas sirvieron como punto de comparación, para hacer correcciones. Únicamente para ésta prueba, se obtuvo la altura de columna de agua (dinámica).

A continuación en la figura 46, se muestra una de varias formas en las que se colocó el tubo de Pitot. En este caso se encuentra en la varilla “D”, a una altura de 20 cm. De igual forma en la figura 47, se muestra un ejemplo donde el tubo de Pitot se encuentra en la varilla “D”, sometido

a una frecuencia de 25 Hz, y se colocó a 14 cm del suelo de la zona de prueba. Proporcionando una altura de columna de agua (dinámica): de 0.85 cm.



Figura 46. Tubo de Pitot Colocado a 20 cm del Suelo de la Zona Prueba en la Varilla "D".

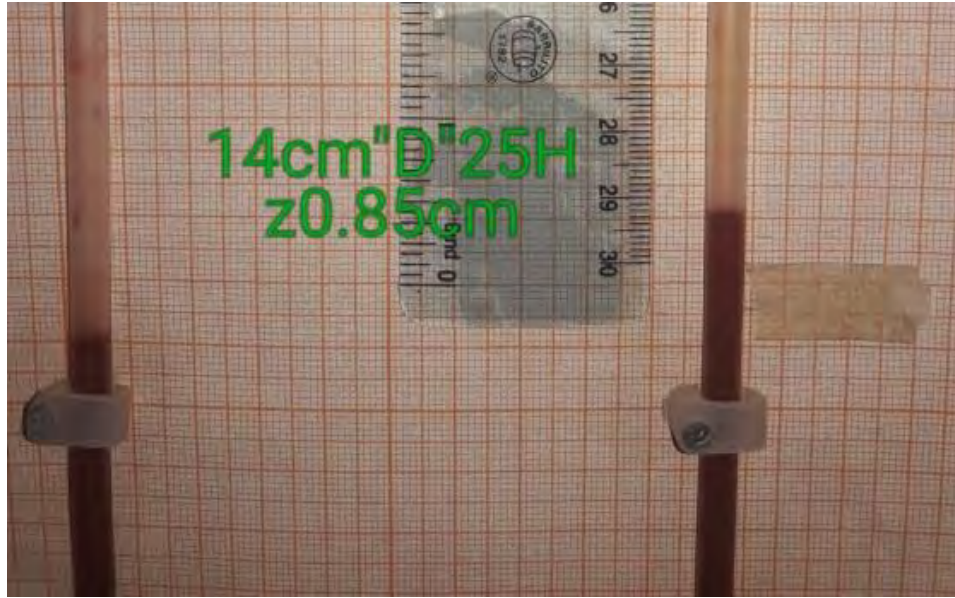
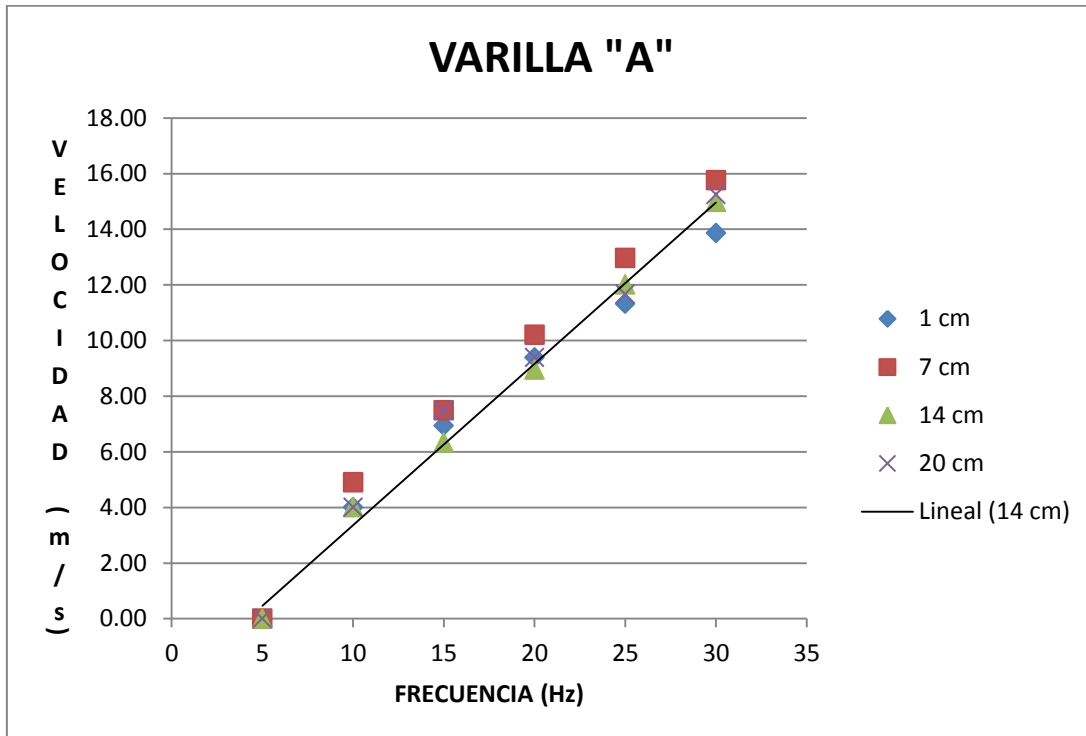


Figura 47. Tubo de Pitot Colocado en la Varilla "D", a 14 cm del Suelo de la Zona de Prueba, y el Motor Sometido a una Frecuencia de 25 Hz; Proporcionando una Altura de Columna de Agua de: 0.85 cm.

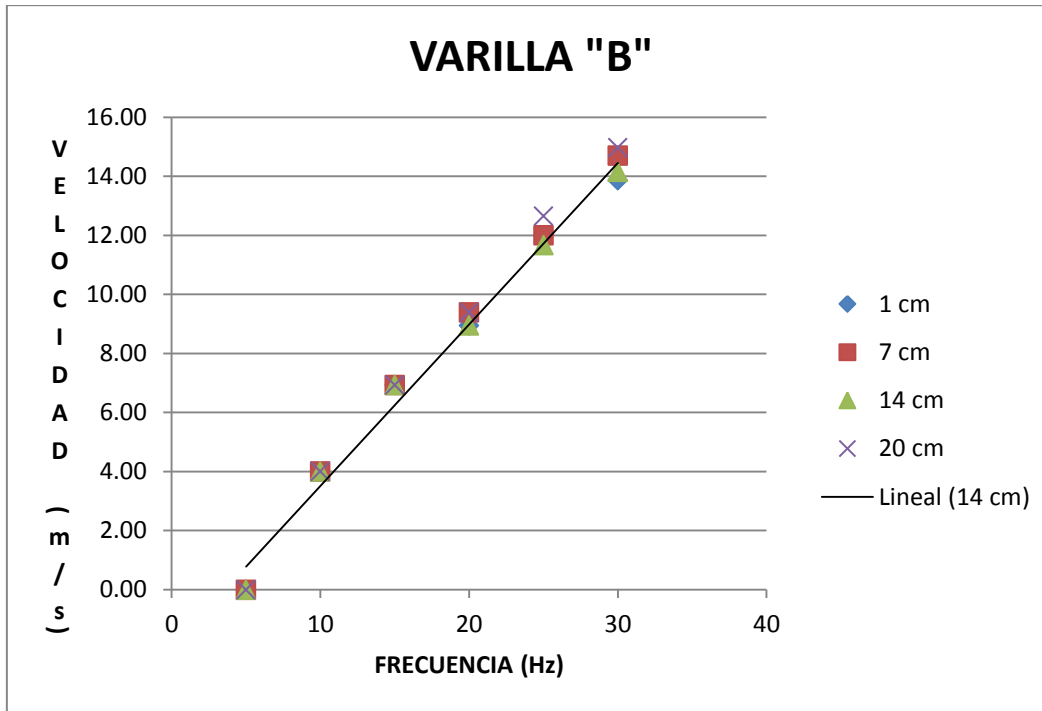
Gráficas en Excel, Tercer Prueba.

Gráfica 11.
Varilla "A".



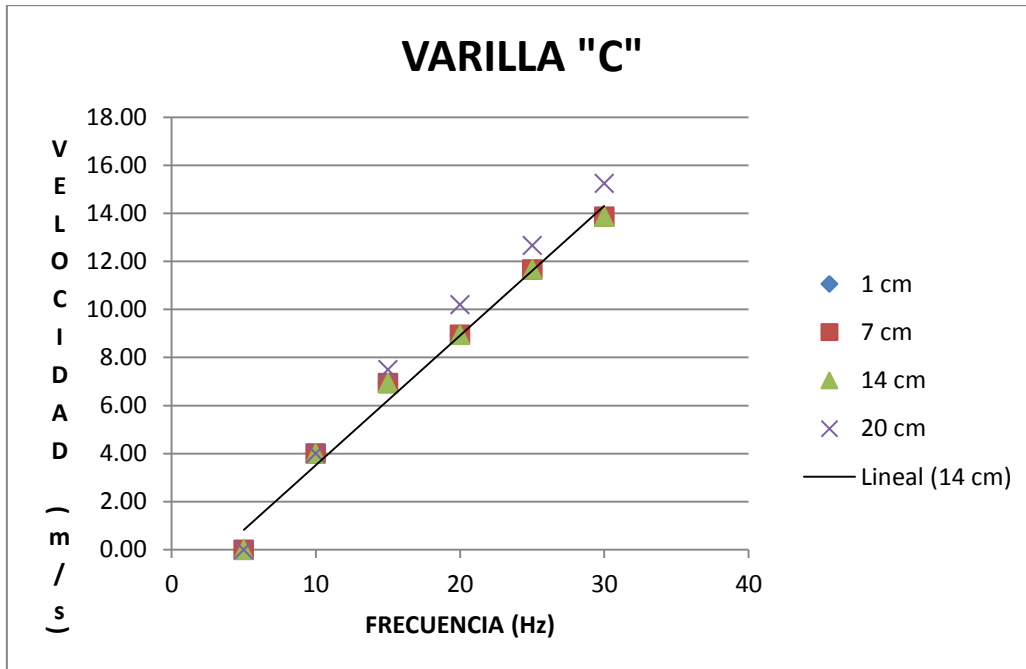
En general la estabilidad que se presenta en la gráfica es buena, cada altura lleva su tendencia pero tolerable.

Gráfica 12.
Varilla "B".



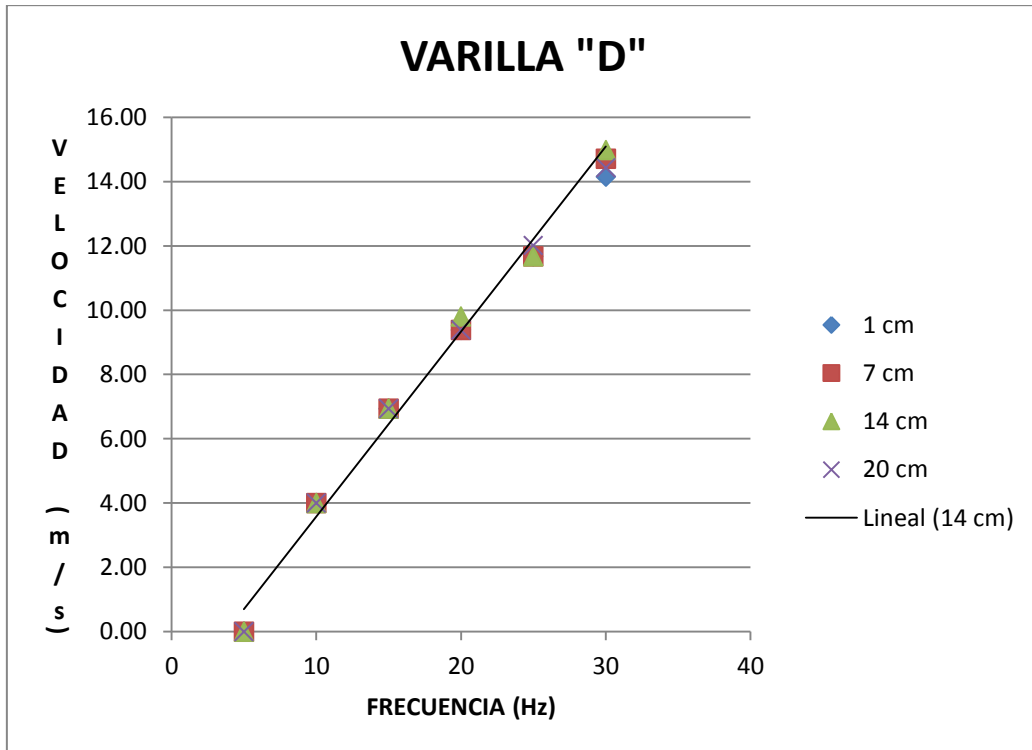
De igual forma, al menos dentro del rango de operación que se trabajó presenta la gráfica buena estabilidad del flujo del aire desde el principio hasta el final de la prueba.

Gráfica 13.
Varilla "C".



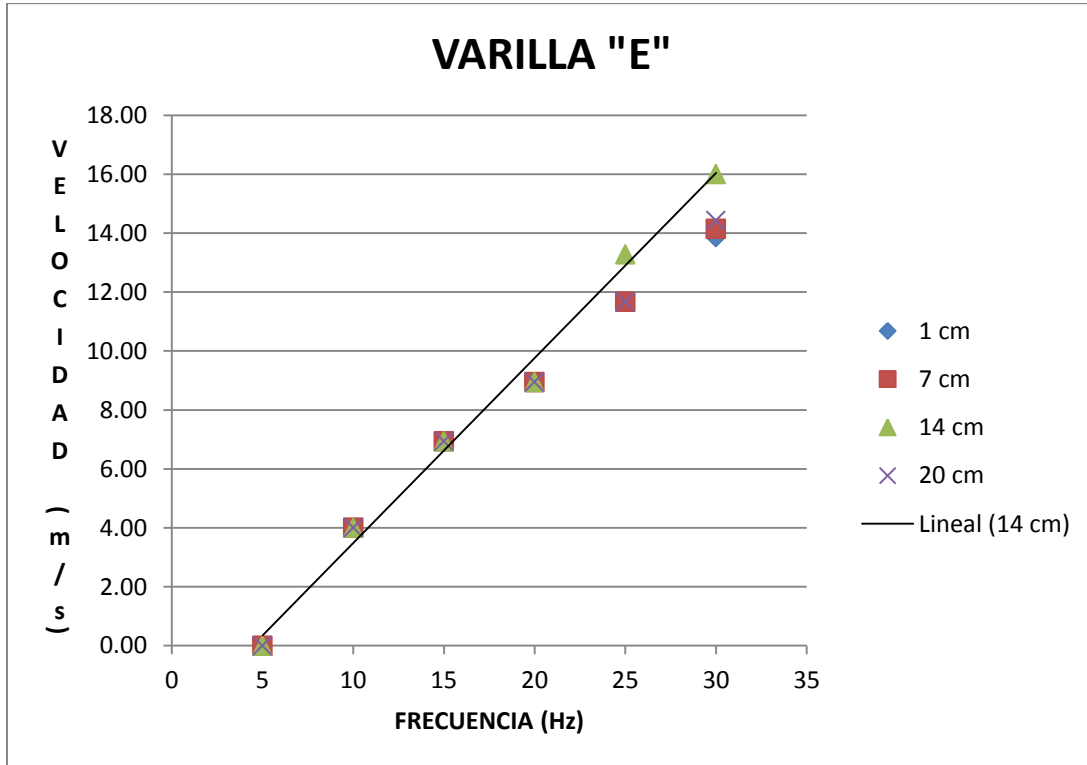
Su comportamiento de esta gráfica es similar al de las anteriores en esta prueba, su estabilidad del flujo del aire en general es buena; la altura de 20 cm lleva su propia línea de tendencia pero está dentro de la tolerancia de la prueba, ya que no es tan distante de la línea de tendencia base.

Gráfica 14.
Varilla "D".



En general esta gráfica se comporta cerca de lo ideal, de igual manera las alturas llevan su propia tendencia, tolerable para esta prueba. Del inicio hasta los 25 Hz aproximadamente es uniforme el flujo del aire.

Gráfica 15.
Varilla "E".



El comportamiento de esta gráfica en general es el peor en toda la prueba. Podría atribuirse este fenómeno, a la vibración que emite el ventilador y el motor. No llevan ni siquiera su propia tendencia las alturas en las que se colocó el tubo de Pitot.

La vibración no solo mueve toda la estructura sino también provoca que la varilla se sacuda, la dimensión de la vibración depende directamente del aumento de la frecuencia del motor.

En general el desempeño del túnel de viento en ésta tercer prueba fue regular. Posteriormente se compararan todos las gráficas de las tres pruebas en el túnel de viento. De igual manera la zona en la que se trabajó fue la misma que la de la segunda prueba, en la figura 43 se observa ésta zona.

Únicamente la varilla “E” fue la peor prueba en esta tercer prueba, sin embargo las varillas “A”, “B”, “C”, y “D”, su comportamiento fue bueno, demostró cada altura en la que se colocó el tubo de Pitot, que aunque llevaban su propia tendencia, no eran muy distantes entre sí. En general la varilla “D”, fue la que se comportó cerca de lo ideal.

De igual forma se analizaron las tablas de esta prueba ubicadas en el **capítulo IX**.

Varilla “A”.

La velocidad obtenida a partir de los datos de las mediciones de la columna de agua (dinámica), siempre es mayor a 7 cm de altura del nivel del suelo de la zona de prueba.

Varilla “B”.

De 5 a 15 Hz con base a los datos de la altura de columna de agua (dinámica) la velocidad del flujo del aire se mantiene uniforme. Las mediciones a 25 Hz, inician con uniformidad pero se desestabilizan en las últimas dos mediciones. A 30 Hz la uniformidad no existe.

Varilla “C”.

La uniformidad del flujo del aire se presenta a partir de los 10 Hz hasta los 30 Hz. En general el flujo de aire en esta varilla se comporta de manera regular.

Varilla “D”.

Según la tabla 16, ubicada en el **capítulo IX**, existe uniformidad del flujo de aire de los 10 a 15 Hz. De 20 a 25 Hz el flujo de aire es bueno, aunque a los 30 Hz la uniformidad del flujo del aire es nula.

Varilla “E”.

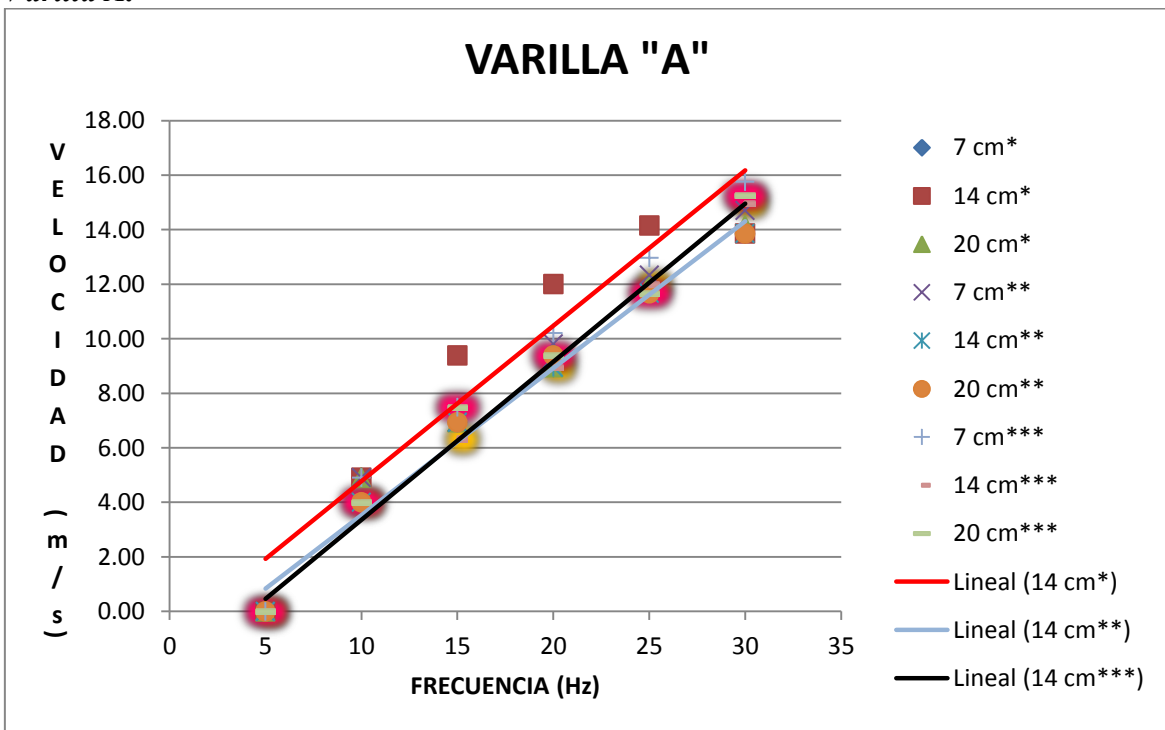
De igual forma, con base a la tabla 17 ubicada en el **capítulo IX**, a partir de los 10 Hz hasta los 25 Hz es regular la uniformidad del flujo del aire, aunque a los 30 Hz no exista ésta.

Comparación de las Gráficas de Excel

Finalmente se compararon todas las gráficas anteriores de las tres pruebas, quedando juntas en una sola gráfica por cada varilla. De igual manera en estas gráficas se representó la velocidad del flujo del aire con respecto a la frecuencia del motor. Se realizó esta comparación con el fin de visualizar el grado de dispersión de las líneas de tendencia de las dos primeras pruebas, teniendo como base la línea de tendencia de la tercer prueba.

Varilla "A"

Gráfica 16.
Varilla A.



Finalmente se realizó una comparación de las tres pruebas de la varilla “A”, se juntaron éstas en una sola gráfica, se consigue observar en la primer prueba⁸ que únicamente a 10 Hz el flujo del aire es uniforme, el resto de la prueba es inestable, hubo mucha dispersión de datos. La segunda prueba⁹ es inestable desde el inicio hasta poco antes de los 15 Hz, a partir de los 15 Hz hasta el final de la prueba el flujo del aire es uniforme a 14 y 20 cm; la altura de 7 cm presenta buena estabilidad, su línea de tendencia es diferente a la línea de tendencia base, aunque es tolerable para esta prueba. En la tercer y última prueba¹⁰ llevan su propia línea de tendencia las alturas de 7 y 20 cm, están algo distantes entre sí, pero es tolerable porque no existen puntos dispersos.

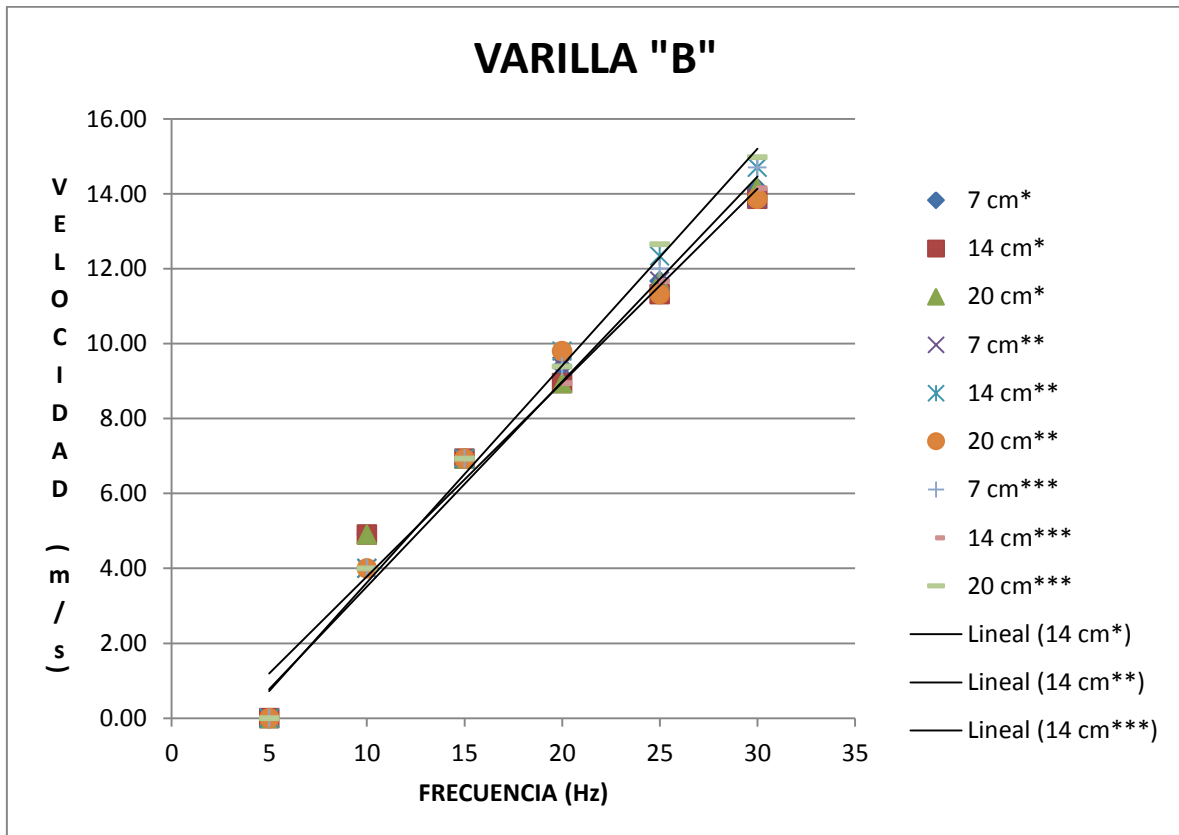
⁸ Primer prueba: *

⁹ Segunda prueba **

¹⁰ Tercer prueba ***

Varilla "B"

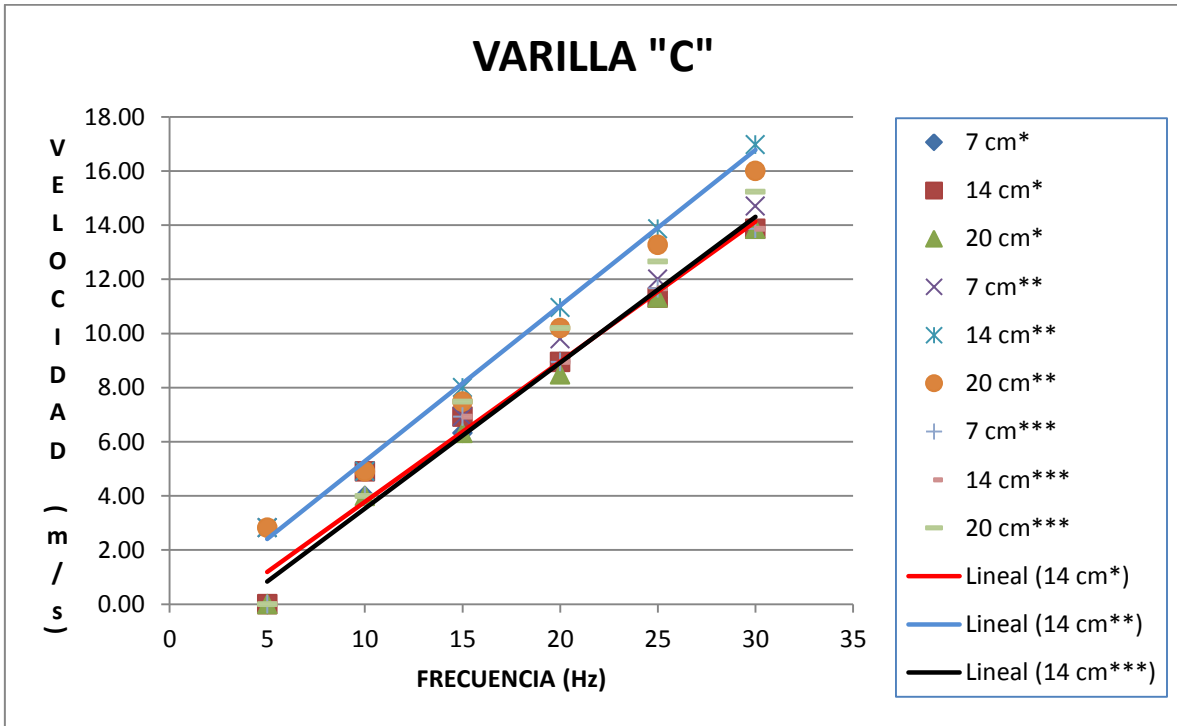
Gráfica 17.
Varilla "B".



En general comparada con las demás gráficas la estabilidad del flujo del aire en esta gráfica fue la mejor, esto quiere decir que las tres líneas de tendencia de las tres pruebas en la varilla "B" estuvieron muy similares, por lo tanto se puede corroborar que al menos en esta zona del plano de medición existe estabilidad en el flujo del aire.

Varilla "C".

Gráfica 18.
Varilla "C".

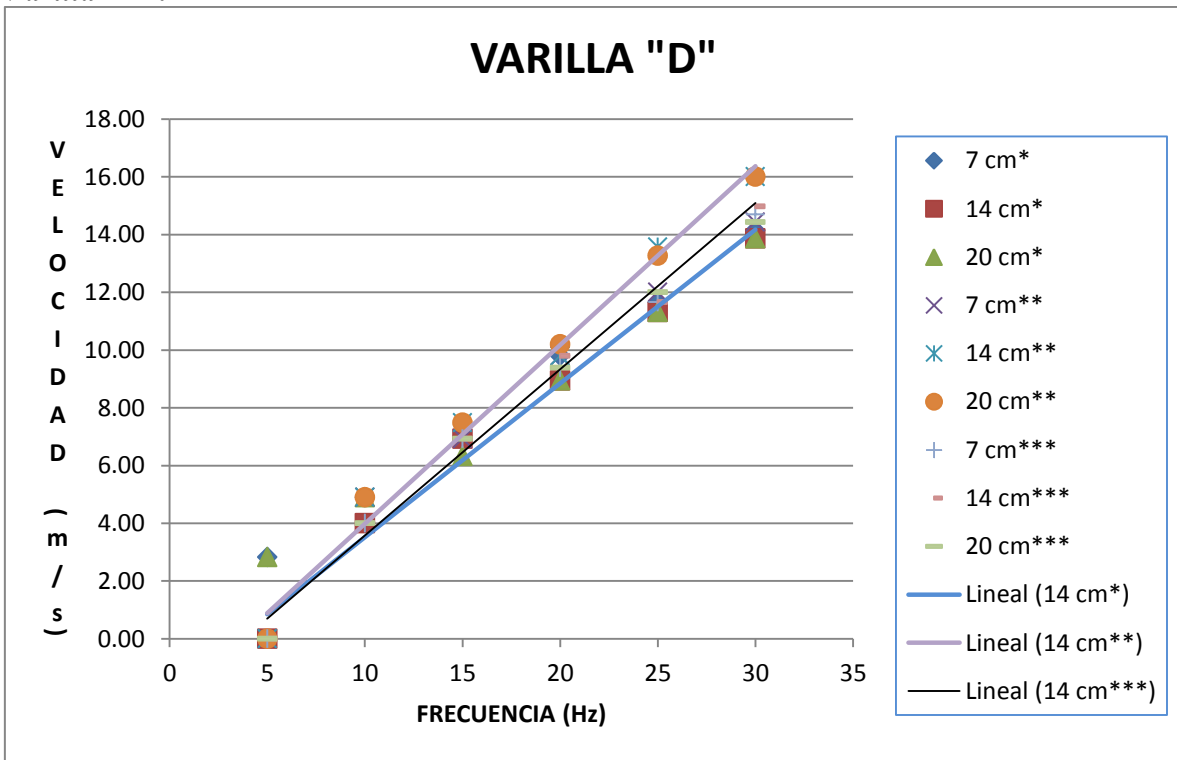


Se consigue percibir en la primer prueba que, existe uniformidad del flujo del aire desde el comienzo hasta final de la prueba en las alturas de: 7 y 20 cm. Inesperadamente a 10 Hz se desestabiliza el flujo del aire a la altura de 14 cm, alejándose un poco de su propia línea de tendencia, aunque conforme se aumentó la frecuencia del motor se estabilizó el flujo del aire un poco antes de los 15 Hz, finalmente el flujo del aire resultó uniforme. Ahora bien, en la segunda prueba existe estabilidad del flujo del aire desde el comienzo de la prueba hasta su culminación. De hecho existe uniformidad del flujo del aire del inicio de la prueba hasta los 10 Hz. Aunque la altura de 7 cm haya tenido su propia línea de tendencia, es tolerable ya que no es muy distante de la línea de tendencia base, y sus datos no están dispersos. Finalmente, la estabilidad de la tercer

prueba es buena, aunque la altura de 20 cm lleve su propia línea de tendencia, se considera aceptable ya que de igual forma no están dispersos sus datos.

Varilla “D”.

Gráfica 19.
Varilla “D”.



En la posición del tubo de Pitot de 7 cm en la varilla de la primer prueba, se consigue visualizar que describe en su camino su propia línea de tendencia, ésta es tolerable ya que no es muy distante de la línea de tendencia base. Existe uniformidad del flujo del aire de los 25 Hz hasta la conclusión de la prueba. A la altura de 20 cm inicia algo inestable la prueba, pero a los 15 Hz el flujo del aire es uniforme hasta el final.

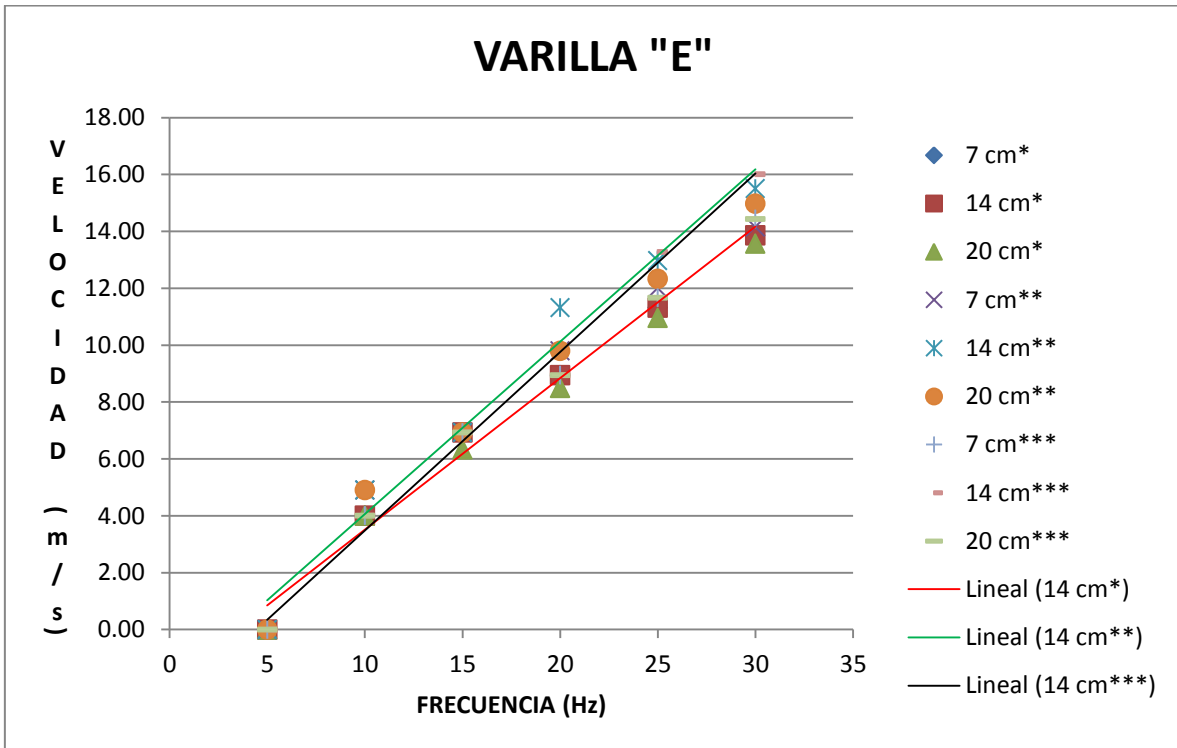
En general la segunda prueba es buena, aunque la altura de 7 cm lleva su propia línea de tendencia la cual es estable, y no es distante con respecto a la línea de tendencia base. Desde el

principio hasta el final de la prueba es uniforme el flujo del aire en las posiciones del tubo de Pitot: 14 y 20 cm en la varilla.

La tercer y última prueba que se realizó, se comporta cerca de lo ideal.

Varilla “E”.

Gráfica 20.
Varilla “E”.



Se considera que la primer prueba tiene el mejor comportamiento de todas las varillas al menos en ésta prueba. Llegando a estar casi en lo ideal.

Las alturas 7 y 20 cm en la segunda prueba, llevan una línea de tendencia diferente a la línea de tendencia base, la cual es tolerable por no estar alejada, y no tener puntos dispersos. Existe uniformidad del flujo del aire desde el principio de la prueba hasta los 15 Hz. Las alturas antes mencionadas llevan una línea de tendencia similar a la línea de tendencia base, repentinamente a

20 Hz se desestabiliza el flujo del aire en la altura de 14 cm, pero conforme aumenta la frecuencia del motor se estabiliza de nuevo.

El flujo del aire es uniforme hasta los 15 Hz en la tercer prueba. Las alturas de 7 y 20 cm llevan una línea de tendencia diferente a la línea de tendencia base, la cual es estable, de igual forma se considera tolerable ya que no es muy distante con respecto a la línea de tendencia base y sus datos no están dispersos.

Gráficas Realizadas en un Programa en Línea.

Únicamente en la tercer y última prueba se utilizó en línea un programa para graficar en mapas de contorno, para visualizar aún mejor la zona en el plano de medición, ésta se encuentra en la figura 43. Esta gráfica es llamada “New Contour Map”, consiste en trabajar con las tablas de la tercer prueba que se encuentran el **capítulo IX**, a diferencia de las gráficas realizadas en Excel, se trabaja por frecuencias, solamente se ingresan todos los datos de la altura de columna de agua con la condición de que sean diferentes de cero¹¹, ya que el programa grafica en los ejes: “x” (distancia de la pared de la cámara de pruebas a la varilla determinada), “y” (distancia del suelo de la cámara de pruebas a la posición del tubo de Pitot), y “w” (velocidad del flujo del aire).

La gráfica se llama “New Contour Map”, mapa de contorno es español, consiste en observar los contornos de colores en toda la zona del plano de medición, lo ideal es que todo sea de un solo tono, los tonos van de morado a rojo, siendo éste último el que mayor velocidad del flujo del aire tiene, y el morado el más bajo. Cuando se forma en una zona o en varios remolinos de

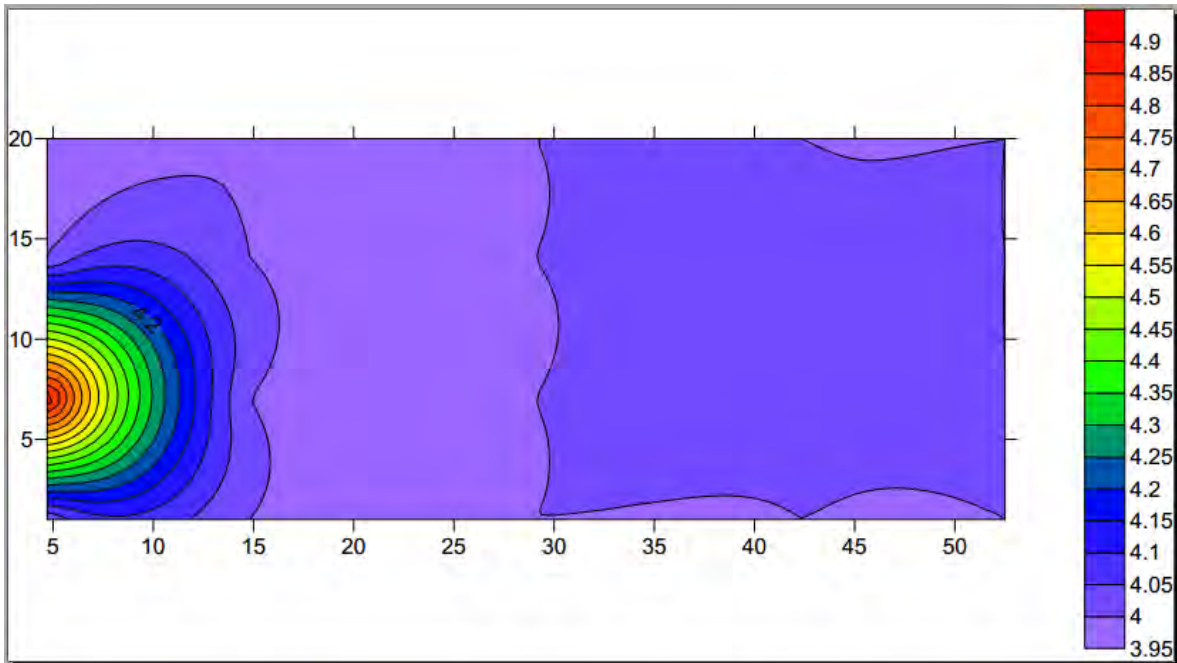
¹¹ Para 5 Hz no se pudo graficar debido a que todos los datos obtenidos en el eje “w” (el de la velocidad del viento) eran cero, el programa en línea no grafica en solo dos ejes.

colores, es debido a que en esa zona existe turbulencia en el flujo del aire, cuando no, quiere decir que el flujo del aire es estable.

Tercer Prueba.

En este caso, se manejó una frecuencia de 10 Hz con las 5 varillas (A, B, C, D y E) respectivamente.

Gráfica 21.
Para 10 Hz.



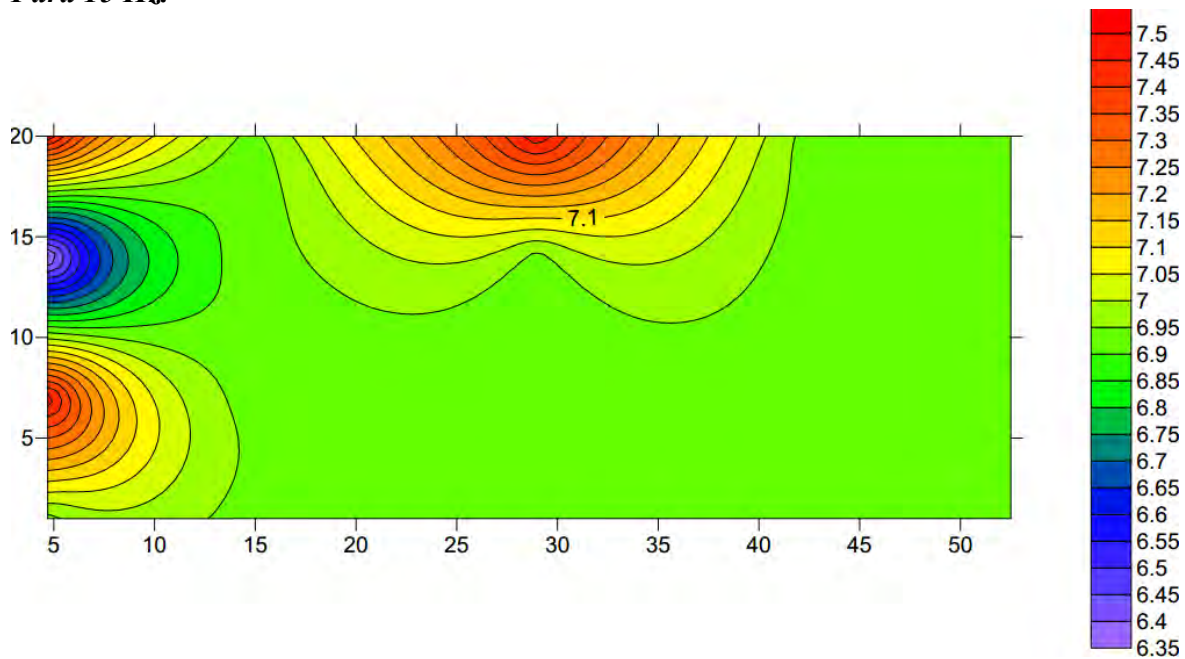
Se consigue observar con claridad que el flujo del aire que pasa al menos por el rango trabajado en la zona de prueba, en su mayoría el flujo del aire es estable; solamente con excepción de la zona del remolino el flujo del aire es turbulento.

Según la gráfica la inestabilidad se presenta al costado izquierdo en la parte inferior; esta parte maneja velocidades más altas, a partir de 4.2 m/s en adelante; en general en la mayor parte del plano existe la estabilidad del flujo del aire.

Para 15 Hz.

En este caso, se maneja una frecuencia de 15 Hz en las 5 varillas (A, B, C, D y E) respectivamente.

Gráfica 22.
Para 15 Hz.



Se consigue visualizar en esta gráfica, que existe uniformidad del flujo del aire en más de la mitad de la zona del plano de medición. De igual manera existen 4 remolinos de turbulencia en el flujo del aire.

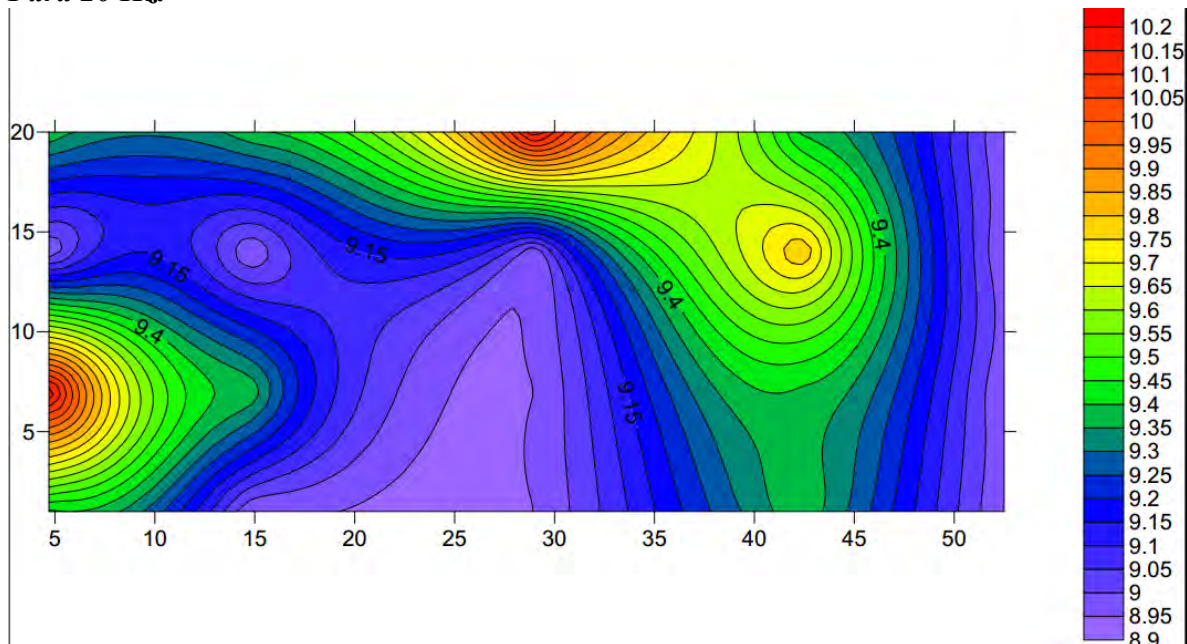
Al manejar más velocidad del flujo del aire que en la anterior prueba, existe más inestabilidad en el flujo del aire, esto es debido a que, al aumentar la frecuencia del motor, aumenta también la vibración de la estructura del túnel de viento, transmitiéndola a toda la estructura. El ventilador de igual forma le transmite vibración a la estructura del túnel de viento, esto debido a su

desbalance. En conclusión existe inestabilidad en el costado izquierdo y en la parte central superior.

Para 20 Hz.

En este caso, se maneja una frecuencia de 20 Hz en las 5 varillas (A, B, C, D y E) respectivamente.

Gráfica 23.
Para 20 Hz.



Se consigue visualizar en la gráfica la diversidad de contornos de colores y además dispersos.

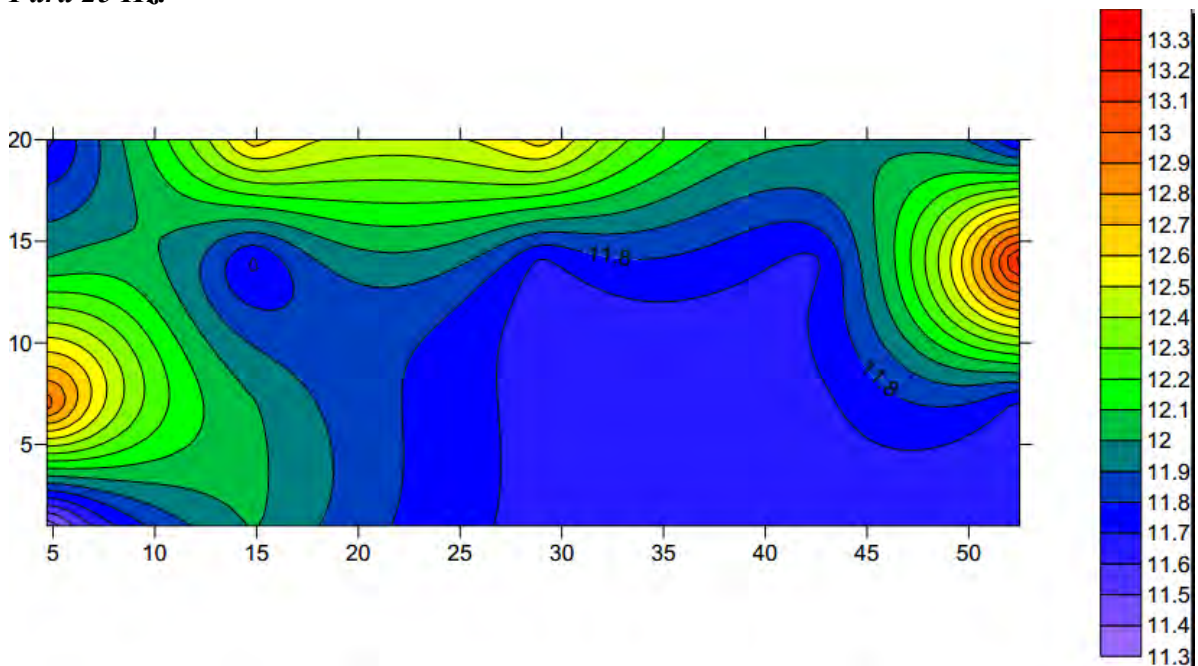
Estos remolinos de inestabilidad del viento están ubicados en el costado inferior izquierdo, así como también en la zona superior del plano de medición, extendiéndose desde el costado izquierdo hasta un poco menos del costado derecho y aún todavía baja hasta la parte inferior.

Debido a tanta turbulencia en el flujo del aire en esta prueba se considera que a 20 Hz la estabilidad del flujo del aire es mala.

Para 25 Hz.

En este caso, se maneja una frecuencia de 25 Hz en las 5 varillas (A, B, C, D y E) respectivamente.

Gráfica 24.
Para 25 Hz.



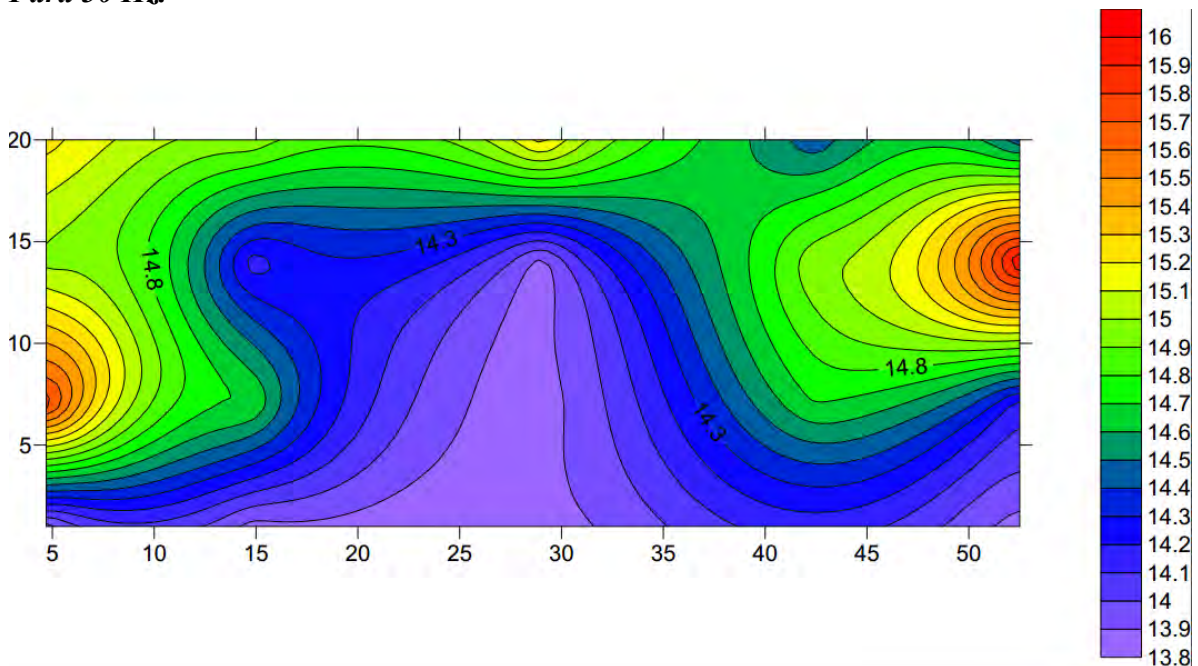
Con base en los contornos de color en la gráfica en la parte central, inferior central e inferior derecha, existe estabilidad en el flujo del aire. De igual manera se visualizan los remolinos de turbulencia del flujo del aire los cuales se encuentran en: el costado izquierdo inferior, desde el costado superior derecho hasta un poco menos del costado superior izquierdo y también en el costado superior derecho.

De igual forma la turbulencia del flujo del aire es generada por la vibración que se le transmite a la estructura del túnel de viento.

Para 30 Hz.

En este caso, se maneja una frecuencia de 30 Hz en las 5 varillas (A, B, C, D y E) respectivamente.

Gráfica 25.
Para 30 Hz.



En toda la zona del plano de medición trabajado existen diferentes contornos de colores de velocidad en el flujo del aire debido a la turbulencia, por lo que, se dice que a 30 Hz no existe la estabilidad del flujo del aire.

Específicamente la inestabilidad se presenta en el costado izquierdo central y superior, extendiéndose por la parte superior hacia el costado derecho y central superior.

Capítulo VI

Conclusión

Como primer tarea en éste trabajo de tesis, se realizó el plano lateral y frontal de la estructura del túnel de viento de área de trabajo de: 62 cm x 60 cm, el cual cuenta con sus principales características.

Posteriormente se realizaron las modificaciones al túnel de viento en la que se obtuviese una reducción de las vibraciones ocasionadas por su funcionamiento. Éstas permitieron incrementar el rango de trabajo en el túnel de viento, actualmente éste puede trabajar en un rango de frecuencias de 0-25 Hz.

Primero se inició con la sustitución de las juntas de cámara de aire de neumático de caucho de la base del motor por unas de llanta de caucho de automóvil, siendo éstas últimas más gruesas y resistentes, por sus propiedades absorben mejor la vibración del motor.

Posteriormente se llevó la polea de la flecha del ventilador al torno a encasquillar el diámetro interior, esto consistió en colocar un buje en el diámetro interior de la polea para que se consiguiera ajustar el espesor adecuado entre la flecha del ventilador y ésta, se consiguió eliminar el balanceo de la polea, la cual lo transmitía a la estructura del túnel de viento de alguna manera.

Finalmente con las herramientas adecuadas se alineó la polea de la flecha del motor con la flecha del ventilador, de igual forma contribuyo esto a reducir cualquier tipo de movimiento que éste le transmitiese a la estructura del túnel de viento por su desalineación.

A continuación se presentan las conclusiones de la caracterización del flujo que se le realizó al túnel de viento, la cual consistió en la realización de 3 pruebas similares en la cámara de

pruebas, esto es porque en las tres se trabajó con el tubo de Pitot, éste se colocaba en cada varilla, las cuales estaban dispersas simétricamente, creando la zona del plano de medición.

En conclusión las 5 varillas graficadas en Excel se comportaron en las tres pruebas como se describe a continuación.

Varilla “A”: Se consigue visualizar en la primer prueba que únicamente a 10 Hz el flujo del aire es uniforme, el resto de la prueba es inestable, hubo mucha dispersión de datos. La segunda prueba es inestable desde en el principio, a partir de los 15 Hz hasta la conclusión de la prueba el flujo del aire es uniforme a 14 y 20 cm; aunque la altura de 7 cm lleva su propia línea de tendencia es tolerable para esta prueba, presenta estabilidad en el flujo del aire. En la tercer y última prueba llevan su propia línea de tendencia las alturas de 7 y 20 cm, están algo distantes entre sí, pero de igual forma es tolerable porque no existen puntos dispersos.

Varilla “B”: En general comparada con las demás gráficas la estabilidad del flujo del aire en esta gráfica fue la mejor, esto quiere decir que las tres líneas de tendencia de las tres pruebas en la estuvieron muy similares.

Varilla “C”: Se consigue percibir en la primer prueba que, existe uniformidad del flujo del aire desde el comienzo hasta final de la prueba en las alturas de: 7 y 20 cm. Inesperadamente a 10 Hz se desestabiliza el flujo del aire a la altura de 14 cm, alejándose un poco de su propia línea de tendencia, aunque conforme se aumentó la frecuencia del motor, se estabilizó el flujo del aire un poco antes de los 15 Hz, finalmente el flujo del aire resultó uniforme. Ahora bien, en la segunda prueba existe estabilidad del flujo del aire desde el comienzo de la prueba hasta su culminación. De hecho existe uniformidad del flujo del aire del inicio de la prueba hasta los 10 Hz. Aunque las alturas de 1 y 7 cm hayan tenido su propia línea de tendencia, es tolerable ya que no es muy distante de la línea de tendencia base, y sus datos no están dispersos. Finalmente, la

estabilidad de la tercer prueba es buena, aunque la altura de 20 cm lleve su propia línea de tendencia, se considera aceptable ya que de igual forma no están dispersos sus datos.

Varilla “D”: La posición del tubo de Pitot de 7 cm en la primer prueba, describe su propia línea de tendencia, tolerable ya que no es muy distante de la línea de tendencia base. Existe uniformidad del flujo del aire de los 25 Hz hasta la conclusión de la prueba. La altura de 20 cm inicia algo inestable, pero a los 15 Hz el flujo del aire es unirme hasta el final. En general la segunda prueba es buena, aunque la altura de 7 cm lleva su propia línea tendencia la cual es estable, y no es distante con respecto a la línea de tendencia base. Desde el principio hasta el final de la prueba es uniforme el flujo del aire en las posiciones del tubo de Pitot: 14 y 20 cm en la varilla. La tercer y última prueba que se realizó, se comporta cerca de lo ideal.

Varilla “E”: Se considera que la primer prueba tiene el mejor comportamiento de todas las varillas al menos en ésta prueba. Llegando a estar casi en lo ideal. Las alturas 7 y 20 cm en la segunda prueba, llevan una línea de tendencia diferente a la línea de tendencia base, la cual es tolerable por no estar alejada, y no tener puntos dispersos. Existe uniformidad del flujo del aire desde el principio de la prueba hasta los 15 Hz. Las alturas antes mencionadas llevan una línea de tendencia similar a la línea de tendencia base, repentinamente a 20 Hz se desestabiliza el flujo del aire en la altura de 14 cm, pero conforme aumenta la frecuencia del motor se estabiliza de nuevo. El flujo del aire es uniforme hasta los 15 Hz en la tercer prueba. Las alturas de 7 y 20 cm llevan una línea de tendencia diferente a la línea de tendencia base, la cual es estable, de igual forma se considera tolerable ya que no es muy distante con respecto a la línea de tendencia base y sus datos no están dispersos.

De igual manera a continuación se presenta la conclusión de las gráficas realizadas en línea, en un programa, el cual nos graficó en mapas de contorno, para visualizar de mejor manera los cambios en el flujo del aire con diferentes tonos de color en la zona del plano de medición.

Para 10 Hz: El flujo del aire que pasa al menos por el rango trabajado en el plano de medición en esta prueba, en su mayoría es estable. La inestabilidad del flujo del aire se presenta en el costado izquierdo en la parte inferior del plano de medición.

Para 15 Hz: Existe uniformidad del flujo del aire en más de la mitad de la zona del plano de medición. Sin embargo existen 4 remolinos de turbulencia en el flujo del aire, en el costado izquierdo y en la parte central superior del plano de medición.

Para 20 Hz: Se consigue visualizar en la gráfica la diversidad de contornos de colores y además dispersos. Estos remolinos de inestabilidad del flujo del aire están ubicados en el costado inferior izquierdo, así como también en la zona superior del plano de medición, extendiéndose desde el costado izquierdo hasta un poco menos del costado derecho y aún todavía baja hasta la parte inferior. Debido a tanta turbulencia en el flujo del aire en esta prueba se considera que a 20 Hz la estabilidad del flujo del aire es mala.

Para 25 Hz: Con base en los contornos de color en la gráfica en la parte central, inferior central e inferior derecha, existe estabilidad en el flujo del aire. De igual manera se visualizan los remolinos de turbulencia del flujo del aire los cuales se encuentran en: el costado izquierdo inferior, desde el costado superior derecho hasta un poco menos del costado superior izquierdo y también en el costado superior derecho.

Para 30 Hz: En toda la zona del plano de medición trabajado existen diferentes contornos de colores de velocidad en el flujo del aire debido a la turbulencia, por lo que, se dice que a 30 Hz no existe la estabilidad del flujo del aire. Específicamente la inestabilidad del flujo del aire se

presenta en el costado izquierdo central y superior, extendiéndose por la parte superior hacia el costado derecho y central superior.

Finalmente concluimos que el flujo del aire que pasa por la cámara de pruebas, no es uniforme, pero si es estable al menos en el centro del plano de medición, el cual se encuentra en la figura 43, aún con todo lo que se le modificó, todavía queda más por hacer. El rango adecuado para trabajar es de 0 a 25 Hz, esto es debido a que entre más se aumente la frecuencia del motor, más aumenta la vibración de la estructura del túnel viento, por lo que la turbulencia en el flujo del aire es inevitable.

Capítulo VII

Recomendaciones

Ahora bien en cuanto a un futuro mejoramiento, se recomienda que, el túnel viento debe estar en una base fija, estático, ya que se encuentra fijado en una base con rueditas, dinámico, no son suficientes los “tornillos sinfin” con los que cuenta para inmovilizar el túnel, los cuales se usan para elevar el túnel de viento sobre el nivel del suelo, esta base es deficiente ya que no logra que el túnel de viento se mantenga inmóvil. Por consiguiente, se propone hacerle unos calces de fierro o de madera dura de larga vida, o en caso de ser necesario se recomienda empotrar la base del túnel de viento directamente bajo el suelo.

De igual forma, se recomienda cambiar los rodamientos de la flecha del ventilador, ya que transmiten algo de vibración a la estructura del túnel de viento de cierta forma, pues éstos ya no se encuentran ni lubricados.

Además las bandas de las poleas están desgastadas por el tiempo, éstas ya están resacas, y estiradas, se deberán sustituir éstas por unas nuevas. Ya que transmiten vibración a la estructura del túnel de viento, además, pueden salirse de su posición y dañar a alguna persona.

Asimismo se propone separar la cámara del ventilador del difusor, y colocar entre los dos componentes una junta de neopreno, se cree que reducirá la vibración que transmite el ventilador a la demás estructura del túnel de viento.

Se propone de igual manera llevar a balancear el ventilador con un experto, ya que el movimiento que hace en cierta forma sacude la estructura del túnel de viento, y esto es más evidente cuando se incrementa la frecuencia del motor. Podría ser similar al balanceo de una llanta de automóvil, utilizando plomo.

Encabezado: TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Se recomienda realizar lo anterior mencionado para que el túnel de viento esté en condiciones óptimas de operación.

Capítulo VIII

Referencias Bibliográficas

- AbreProyectosFichero. (s.f.). *bibing.com*. Obtenido de *bibing.com*:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+5.pdf>
- Alberto, M. M. (2012). Diseño y Análisis Computacional para Tunel de Viento de Baja Velocidad. *Repositorio institucional e-Archivo*, 29-32.
- Argumedo Teuffer, P. J. (s.f.). Túnel de Viento. Segunda Fase: Estructura. Hidalgo. *Armfield*. (2019). Obtenido de <http://armfieldonline.com/products/view/c2/tunel-de-viento-subsonico?url=es/products/view/c2/tunel-de-viento-subsonico>
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low speed wind*. Wiley & Sons.
- Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1988). Contraction design for small. *National Aeronautics and Space Administration*.
- Bradshaw, P., & Pankhurst, R. C. (1964). The Design of Low Speed Wind Tunnels. *Progress in Aerospace Sciences*, 5, 69.
- Cajal Caviña, A. (2016). Atenuación de las Ondas de Choque.
- Camacho, F., García, D., & Martínez, R. (2011). Caracterización de un Túnel de Viento de Bajas Velocidades. *Revista Colombiana de Física*, 43, 674.
- Chicas Molina, F. E. (Mayo de 2012). Diseño y Construcción de un Túnel de Viento. Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Martínez de la Calle, J. (2009). *Wikipedia*. Obtenido de <http://www.wikipedia.com>
- Medina Mota, G. (s.f.). *tesis.ipn.com.mx*. Obtenido de *tesis.ipn.com.mx*:
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/441/TESIS%201792008.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1999). The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society. *Technical Notes*.
- Mejía, S., & Cardona, L. (2016). Automatización de un Túnel de Viento para Estudios de Comportamiento de vuelo de insectos (proyecto de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Morales Contreras, O. A., Gómez Roa, A., Paz Gonzáles, J. A., Navarro Torres, J., & Barbosa Saldaña, J. G. (2018). Caracterización del Túnel de Viento Subsónico de ECITEC-UABC. 8-9.
- Morales Contreras, O. A., Gómez Roa, A., Paz Gonzáles, J. A., Navarro Torres, J., & Barbosa Saldaña, J. G. (Septiembre de 2018). *Dialnet*. Obtenido de http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJg5as797fAhUrgK0KHUotBGkQFjABegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ingenierias.uanl.mx%2F80%2Fdocumentos%2FA21_N80_caracterizacion_del_tunel.pdf&usg=AOvVaw1kt0cuhXZUU1PAY
- Pope, A. L., & Goings, K. (1965). *Wind-tunnel Testing*. Willey & Sons.
- Quispe Gonzáles, C. A., Urcuhuaranga Esteban, W. J., & Chiroque Baldera, J. E. (2014). Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de Investigación de Física* 17, 141701601 (2014), 12.

Rojas Zevallos, G. J. (2008). Estudio de la Reducción del Consumo de Combustible de Vehículo Terrestre de 5.5 Toneladas Mediante el uso de Cobertores Aerodinámicos. Lima, Perú.

Silva Treviño, C. J. (08 de Agosto de 2005). Obtenido de http://digeset.uco.mx/tesis_posgrado/Pdf/Carlos_Jeronimo_Silva_T.pdf

Capítulo IX

Tablas

Tabla 3. Primer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla "A".
Varilla "A".

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Altura de Columna de Agua "B" (Estática)
Para 5 Hz	4.5	7	0	0
	4.5	14	0	0
	4.5	20	0	0
	4.5	42.5	0	0
	4.5	51	0.1	0
	4.5	56.5	0	0
Para 10 Hz	4.5	7	0.15	0
	4.5	14	0.15	0
	4.5	20	0.15	0
	4.5	42.5	0.2	0.05
	4.5	51	0.2	0
	4.5	56.5	0.15	0.05
Para 15 Hz	4.5	7	0.3	0.05
	4.5	14	0.3	0.05
	4.5	20	0.3	0
	4.5	42.5	0.3	0.1
	4.5	51	0.35	0.05
	4.5	56.5	0.3	0.05
Para 20 Hz	4.5	7	0.5	0.05
	4.5	14	0.55	0.05
	4.5	20	0.5	0.05
	4.5	42.5	0.6	0.1
	4.5	51	0.65	0.05
	4.5	56.5	0.55	0.1
Para 25 Hz	4.5	7	0.85	0.1
	4.5	14	0.9	0.1
	4.5	20	0.9	0.1
	4.5	42.5	0.9	0.15
	4.5	51	0.95	0.15
	4.5	56.5	0.9	0.1
Para 30 Hz	4.5	7	1.2	0.15
	4.5	14	1.25	0.15
	4.5	20	1.25	0.15
	4.5	42.5	1.3	0.2
	4.5	51	1.3	0.15
	4.5	56.5	1.3	0.15

Elaboración propia.

Tabla 4. Primer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “B”.
Varilla “B”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Altura de Columna de Agua "B" (Estática)
Para 5 Hz	14.3	7	0	0
	14.3	14	0	0
	14.3	20	0	0
	14.3	42.5	0	0
	14.3	51	0.1	0
	14.3	56.5	0	0
Para 10 Hz	14.3	7	0.15	0
	14.3	14	0.15	0
	14.3	20	0.15	0
	14.3	42.5	0.15	0.05
	14.3	51	0.15	0
	14.3	56.5	0.15	0
Para 15 Hz	14.3	7	0.3	0.05
	14.3	14	0.3	0.05
	14.3	20	0.3	0.05
	14.3	42.5	0.3	0.05
	14.3	51	0.3	0.05
	14.3	56.5	0.3	0.05
Para 20 Hz	14.3	7	0.55	0.05
	14.3	14	0.5	0.05
	14.3	20	0.5	0.1
	14.3	42.5	0.5	0.1
	14.3	51	0.5	0.1
	14.3	56.5	0.5	0.1
Para 25 Hz	14.3	7	0.85	0.1
	14.3	14	0.8	0.1
	14.3	20	0.85	0.1
	14.3	42.5	0.85	0.1
	14.3	51	0.8	0.1
	14.3	56.5	0.85	0.15
Para 30 Hz	14.3	7	1.25	0.15
	14.3	14	1.2	0.1
	14.3	20	1.25	0.15
	14.3	42.5	1.25	0.15
	14.3	51	1.15	0.15
	14.3	56.5	1.2	0.15

Elaboración propia.

Tabla 5. Primer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “C”.
Varilla “C”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Altura de Columna de Agua "B" (Estática)
Para 5 Hz	29	7	0	0
	29	14	0	0
	29	20	0	0
	29	42.5	0	0
	29	51	0	0
	29	56.5	0	0
Para 10 Hz	29	7	0.1	0
	29	14	0.15	0
	29	20	0.1	0
	29	42.5	0.15	0
	29	51	0.15	0
	29	56.5	0.15	0
Para 15 Hz	29	7	0.25	0.05
	29	14	0.3	0
	29	20	0.25	0
	29	42.5	0.3	0.05
	29	51	0.3	0
	29	56.5	0.3	0.05
Para 20 Hz	29	7	0.5	0.05
	29	14	0.5	0.05
	29	20	0.45	0.05
	29	42.5	0.6	0.1
	29	51	0.5	0.05
	29	56.5	0.55	0.05
Para 25 Hz	29	7	0.8	0.1
	29	14	0.8	0.1
	29	20	0.8	0.1
	29	42.5	0.85	0.1
	29	51	0.85	0.1
	29	56.5	0.85	0.1
Para 30 Hz	29	7	1.2	0.1
	29	14	1.2	0.1
	29	20	1.2	0.1
	29	42.5	1.25	0.15
	29	51	1.25	0.15
	29	56.5	1.25	0.15

Elaboración Propia.

Tabla 6. Primer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “D”.
Varilla “D”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Altura de Columna de Agua "B" (Estática)
Para 5 Hz	40.6	7	0.05	0
	40.6	14	0	0
	40.6	20	0.05	0
	40.6	42.5	0	0
	40.6	51	0	0
	40.6	56.5	0	0
Para 10 Hz	40.6	7	0.15	0
	40.6	14	0.1	0
	40.6	20	0.15	0
	40.6	42.5	0.1	0
	40.6	51	0.1	0
	40.6	56.5	0.15	0
Para 15 Hz	40.6	7	0.3	0.05
	40.6	14	0.3	0
	40.6	20	0.25	0.05
	40.6	42.5	0.3	0
	40.6	51	0.3	0.05
	40.6	56.5	0.3	0.05
Para 20 Hz	40.6	7	0.6	0.05
	40.6	14	0.5	0.05
	40.6	20	0.5	0.05
	40.6	42.5	0.5	0.05
	40.6	51	0.5	0.1
	40.6	56.5	0.5	0.1
Para 25 Hz	40.6	7	0.85	0.1
	40.6	14	0.8	0.05
	40.6	20	0.8	0.1
	40.6	42.5	0.8	0.1
	40.6	51	0.85	0.1
	40.6	56.5	0.85	0.1
Para 30 Hz	40.6	7	1.25	0.1
	40.6	14	1.2	0.1
	40.6	20	1.2	0.1
	40.6	42.5	1.25	0.15
	40.6	51	1.25	0.15
	40.6	56.5	1.25	0.15

Elaboración Propia.

Tabla 7. Primer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “E”.
Varilla “E”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Altura de Columna de Agua "B" (Estática)
Para 5 Hz	50.2	7	0	0
	50.2	14	0	0
	50.2	20	0	0
	50.2	42.5	0.05	0
	50.2	51	0	0
	50.2	56.5	0	0
Para 10 Hz	50.2	7	0.1	0
	50.2	14	0.1	0
	50.2	20	0.1	0
	50.2	42.5	0.15	0
	50.2	51	0.1	0
	50.2	56.5	0.1	0
Para 15 Hz	50.2	7	0.3	0
	50.2	14	0.3	0
	50.2	20	0.25	0
	50.2	42.5	0.35	0.05
	50.2	51	0.25	0
	50.2	56.5	0.25	0
Para 20 Hz	50.2	7	0.5	0.05
	50.2	14	0.5	0.05
	50.2	20	0.45	0.05
	50.2	42.5	0.55	0.05
	50.2	51	0.5	0.05
	50.2	56.5	0.5	0
Para 25 Hz	50.2	7	0.8	0.1
	50.2	14	0.8	0.1
	50.2	20	0.75	0.05
	50.2	42.5	0.85	0.1
	50.2	51	0.8	0.05
	50.2	56.5	0.8	0.05
Para 30 Hz	50.2	7	1.2	0.1
	50.2	14	1.2	0.1
	50.2	20	1.15	0.1
	50.2	42.5	1.25	0.1
	50.2	51	1.2	0.1
	50.2	56.5	1.2	0.15

Elaboración Propia.

Tabla 8. Segunda Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla "A".
Varilla "A".

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Hilo Caliente "B" (m/s)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	4.5	1	0.05	3	2.83
	4.5	7	0	3.6	0.00
	4.5	14	0	3.69	0.00
	4.5	20	0	3.45	0.00
Para 10 Hz	4.5	1	0.15	6.8	4.90
	4.5	7	0.15	7.7	4.90
	4.5	14	0.1	7.9	4.00
	4.5	20	0.1	7.2	4.00
Para 15 Hz	4.5	1	0.3	10.5	6.93
	4.5	7	0.3	12.1	6.93
	4.5	14	0.3	13	6.93
	4.5	20	0.3	11.3	6.93
Para 20 Hz	4.5	1	0.55	14.8	9.39
	4.5	7	0.6	16.5	9.80
	4.5	14	0.5	17.5	8.95
	4.5	20	0.55	15.3	9.39
Para 25 Hz	4.5	1	0.85	19.5	11.67
	4.5	7	0.95	22.4	12.34
	4.5	14	0.85	23	11.67
	4.5	20	0.85	19.6	11.67
Para 30 Hz	4.5	1	1.3	23.8	14.43
	4.5	7	1.35	26.5	14.70
	4.5	14	1.2	27.2	13.86
	4.5	20	1.2	23.6	13.86

Elaboración Propia.

Tabla 9. Segunda Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “B”.
Varilla “B”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Hilo Caliente "B" (m/s)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	14.3	1	0	2.9	0.00
	14.3	7	0	3.5	0.00
	14.3	14	0	3.72	0.00
	14.3	20	0	3.71	0.00
Para 10 Hz	14.3	1	0.15	5.8	4.90
	14.3	7	0.1	7.5	4.00
	14.3	14	0.1	7.9	4.00
	14.3	20	0.1	8	4.00
Para 15 Hz	14.3	1	0.35	9.2	7.49
	14.3	7	0.3	12.5	6.93
	14.3	14	0.3	13	6.93
	14.3	20	0.3	13.1	6.93
Para 20 Hz	14.3	1	0.55	13.2	9.39
	14.3	7	0.55	16.4	9.39
	14.3	14	0.6	17.9	9.80
	14.3	20	0.6	17.4	9.80
Para 25 Hz	14.3	1	0.8	15.8	11.32
	14.3	7	0.85	21.8	11.67
	14.3	14	0.95	23.3	12.34
	14.3	20	0.8	22.9	11.32
Para 30 Hz	14.3	1	1.2	20.2	13.86
	14.3	7	1.2	25.8	13.86
	14.3	14	1.35	27.1	14.70
	14.3	20	1.2	27.1	13.86

Elaboración Propia.

Tabla 10. Segunda Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “C”.
Varilla “C”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Hilo Caliente "B" (m/s)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	29	1	0.05	3.4	2.83
	29	7	0.05	3.62	2.83
	29	14	0.05	3.46	2.83
	29	20	0.05	3.53	2.83
Para 10 Hz	29	1	0.15	6.9	4.90
	29	7	0.15	7.9	4.90
	29	14	0.15	7.2	4.90
	29	20	0.15	7.4	4.90
Para 15 Hz	29	1	0.35	10.7	7.49
	29	7	0.3	12.6	6.93
	29	14	0.4	11.5	8.00
	29	20	0.35	11.5	7.49
Para 20 Hz	29	1	0.6	15	9.80
	29	7	0.6	17.6	9.80
	29	14	0.75	15.5	10.96
	29	20	0.65	15.4	10.20
Para 25 Hz	29	1	0.9	20	12.01
	29	7	0.9	23	12.01
	29	14	1.2	20.5	13.86
	29	20	1.1	20.2	13.27
Para 30 Hz	29	1	1.3	24	14.43
	29	7	1.35	26.7	14.70
	29	14	1.8	25	16.98
	29	20	1.6	24.6	16.01

Elaboración Propia.

Tabla 11. Segunda Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “D”.
Varilla “D”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Hilo Caliente "A" (m/s)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	40.6	1	0.05	2.6	2.83
	40.6	7	0	3.68	0.00
	40.6	14	0	3.59	0.00
	40.6	20	0	4	0.00
Para 10 Hz	40.6	1	0.15	5.3	4.90
	40.6	7	0.15	7.6	4.90
	40.6	14	0.15	7.4	4.90
	40.6	20	0.15	8.3	4.90
Para 15 Hz	40.6	1	0.3	8.3	6.93
	40.6	7	0.3	12.5	6.93
	40.6	14	0.35	11.9	7.49
	40.6	20	0.35	13.8	7.49
Para 20 Hz	40.6	1	0.6	12.2	9.80
	40.6	7	0.6	16.8	9.80
	40.6	14	0.6	15.5	9.80
	40.6	20	0.65	18.8	10.20
Para 25 Hz	40.6	1	0.9	14.5	12.01
	40.6	7	0.9	21.4	12.01
	40.6	14	1.15	19.9	13.57
	40.6	20	1.1	23.5	13.27
Para 30 Hz	40.6	1	1.3	18.2	14.43
	40.6	7	1.3	24.9	14.43
	40.6	14	1.6	23.5	16.01
	40.6	20	1.6	27.5	16.01

Elaboración Propia.

Tabla 12. Segunda Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “E”.
Varilla “E”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Hilo Caliente (m/s)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	50.2	1	0	2.93	0.00
	50.2	7	0	3.75	0.00
	50.2	14	0	3.58	0.00
	50.2	20	0	3.76	0.00
Para 10 Hz	50.2	1	0.15	5.9	4.90
	50.2	7	0.15	7.8	4.90
	50.2	14	0.15	7.5	4.90
	50.2	20	0.15	7.7	4.90
Para 15 Hz	50.2	1	0.35	9.4	7.49
	50.2	7	0.3	12.6	6.93
	50.2	14	0.3	12	6.93
	50.2	20	0.3	12.2	6.93
Para 20 Hz	50.2	1	0.6	13.3	9.80
	50.2	7	0.6	17.2	9.80
	50.2	14	0.8	16.1	11.32
	50.2	20	0.6	16.2	9.80
Para 25 Hz	50.2	1	0.95	16.9	12.34
	50.2	7	0.9	22.1	12.01
	50.2	14	1.05	21	12.97
	50.2	20	0.95	21.1	12.34
Para 30 Hz	50.2	1	1.35	20.6	14.70
	50.2	7	1.25	26.1	14.15
	50.2	14	1.5	24.6	15.50
	50.2	20	1.4	25.3	14.97

Elaboración propia.

Tabla 13. Tercer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla "A".
Varilla "A".

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	4.5	1	0	0.00
	4.5	7	0	0.00
	4.5	14	0	0.00
	4.5	20	0	0.00
Para 10 Hz	4.5	1	0.1	4.00
	4.5	7	0.15	4.90
	4.5	14	0.1	4.00
	4.5	20	0.1	4.00
Para 15 Hz	4.5	1	0.3	6.93
	4.5	7	0.35	7.49
	4.5	14	0.25	6.33
	4.5	20	0.35	7.49
Para 20 Hz	4.5	1	0.55	9.39
	4.5	7	0.65	10.20
	4.5	14	0.5	8.95
	4.5	20	0.55	9.39
Para 25 Hz	4.5	1	0.8	11.32
	4.5	7	1.05	12.97
	4.5	14	0.9	12.01
	4.5	20	0.85	11.67
Para 30 Hz	4.5	1	1.2	13.86
	4.5	7	1.55	15.76
	4.5	14	1.4	14.97
	4.5	20	1.45	15.24

Elaboración Propia.

Tabla 14. Tercer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “B”.
Varilla “B”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	14.3	1	0	0.00
	14.3	7	0	0.00
	14.3	14	0	0.00
	14.3	20	0	0.00
Para 10 Hz	14.3	1	0.1	4.00
	14.3	7	0.1	4.00
	14.3	14	0.1	4.00
	14.3	20	0.1	4.00
Para 15 Hz	14.3	1	0.3	6.93
	14.3	7	0.3	6.93
	14.3	14	0.3	6.93
	14.3	20	0.3	6.93
Para 20 Hz	14.3	1	0.5	8.95
	14.3	7	0.55	9.39
	14.3	14	0.5	8.95
	14.3	20	0.55	9.39
Para 25 Hz	14.3	1	0.9	12.01
	14.3	7	0.9	12.01
	14.3	14	0.85	11.67
	14.3	20	1	12.66
Para 30 Hz	14.3	1	1.2	13.86
	14.3	7	1.55	15.76
	14.3	14	1.4	14.97
	14.3	20	1.45	15.24

Elaboración propia.

Tabla 15. Tercer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “C”.
Varilla “C”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	29	1	0	0.00
	29	7	0	0.00
	29	14	0	0.00
	29	20	0	0.00
Para 10 Hz	29	1	0.1	4.00
	29	7	0.1	4.00
	29	14	0.1	4.00
	29	20	0.1	4.00
Para 15 Hz	29	1	0.3	6.93
	29	7	0.3	6.93
	29	14	0.3	6.93
	29	20	0.35	7.49
Para 20 Hz	29	1	0.5	8.95
	29	7	0.5	8.95
	29	14	0.5	8.95
	29	20	0.65	10.20
Para 25 Hz	29	1	0.85	11.67
	29	7	0.85	11.67
	29	14	0.85	11.67
	29	20	1	12.66
Para 30 Hz	29	1	1.2	13.86
	29	7	1.2	13.86
	29	14	1.2	13.86
	29	20	1.45	15.24

Elaboración Propia.

Tabla 16. Tercer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “D”.
Varilla “D”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	40.6	1	0	0.00
	40.6	7	0	0.00
	40.6	14	0	0.00
	40.6	20	0	0.00
Para 10 Hz	40.6	1	0.1	4.00
	40.6	7	0.1	4.00
	40.6	14	0.1	4.00
	40.6	20	0.1	4.00
Para 15 Hz	40.6	1	0.3	6.93
	40.6	7	0.3	6.93
	40.6	14	0.3	6.93
	40.6	20	0.3	6.93
Para 20 Hz	40.6	1	0.55	9.39
	40.6	7	0.55	9.39
	40.6	14	0.6	9.80
	40.6	20	0.55	9.39
Para 25 Hz	40.6	1	0.85	11.67
	40.6	7	0.85	11.67
	40.6	14	0.85	11.67
	40.6	20	0.9	12.01
Para 30 Hz	40.6	1	1.25	14.15
	40.6	7	1.35	14.70
	40.6	14	1.4	14.97
	40.6	20	1.3	14.43

Elaboración Propia

Tabla 17. Tercer Prueba, Distribución de Objetivos de Medición Sobre la Varilla “E”.
Varilla “E”.

Frecuencia	Eje "X"	Eje "Y"	Altura de Columna de Agua "A" (Dinámica)	Velocidad (m/s)
Para 5 Hz	50.2	1	0	0.00
	50.2	7	0	0.00
	50.2	14	0	0.00
	50.2	20	0	0.00
Para 10 Hz	50.2	1	0.1	4.00
	50.2	7	0.1	4.00
	50.2	14	0.1	4.00
	50.2	20	0.1	4.00
Para 15 Hz	50.2	1	0.3	6.93
	50.2	7	0.3	6.93
	50.2	14	0.3	6.93
	50.2	20	0.3	6.93
Para 20 Hz	50.2	1	0.5	8.95
	50.2	7	0.5	8.95
	50.2	14	0.5	8.95
	50.2	20	0.5	8.95
Para 25 Hz	50.2	1	0.85	11.67
	50.2	7	0.85	11.67
	50.2	14	1.1	13.27
	50.2	20	0.85	11.67
Para 30 Hz	50.2	1	1.2	13.86
	50.2	7	1.25	14.15
	50.2	14	1.6	16.01
	50.2	20	1.3	14.43

Elaboración Propia.