

DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS TIPO TÚNEL DE VIENTO PARA LA
SELECCIÓN DE VENTILADORES EN REFRIGERADORES DOMÉSTICOS.

JUAN ANTONIO TANGARIFE TUBERQUIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2015

DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS TIPO TÚNEL DE VIENTO PARA LA
SELECCIÓN DE VENTILADORES EN REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

JUAN ANTONIO TANGARIFE TUBERQUIA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero Mecánico

Director

CESAR ALEJANDRO ISAZA ROLDAN

Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2015

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín 30, Julio de 2015.

“Tus palabras y acciones me demostraron como se puede lograr todo lo que soñamos, en ese instante de sagacidad entendí todo lo que desearía”

Juan Antonio

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su gran apoyo incondicional. Su esfuerzo y sacrificio me permitió entender la importancia de mis sueños. Contribuirían arduamente en el crecimiento de mis ideas y el progreso de mi formación personal y profesional.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de Colciencias, a través del proyecto denominado "Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A" Código 1210-502-27609.

Al centro de investigación, desarrollo y calidad en refrigeración y climatización, en especial a mi director Cesar Alejandro Isaza Roldan por el apoyo absoluto y mi gratitud por compartir su conocimiento.

Agradezco al Ingeniero Mecánico Herman David Mejía Benjumea. Su colaboración y sugerencias técnicas aportaron claridad a mis ideas.

Le agradezco a la empresa HACEB, en especial a Juan Carlos Ospina O. analista funcional de ingeniería de producto refrigeración por su contribución y confianza a lo largo de este proyecto.

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda hicieron posible la realización durante sus diferentes etapas para el desarrollo de mi formación.

CONTENIDO

GLOSARIO	14
ABREVIATURAS	17
RESUMEN.....	18
INTRODUCCIÓN.....	19
1. CONCEPTOS GENERALES	21
1.1 PRELIMINAR.....	21
1.2 CLASIFICACIÓN DE VENTILADORES.....	22
1.2.1 Ventiladores Axiales.....	22
1.2.2 Ventiladores centrífugos.....	23
1.3 CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS VENTILADORES.....	25
1.4 MOTO VENTILADORES.	27
1.5 REFRIGERADORES DOMESTICOS.	30
1.5.1 Evaporador.....	31
1.5.2 Compresor.	35
1.5.3 El condensador.	35
1.6 VENTILADORES EN REFRIGERADORES DOMÉSTICOS.....	36
1.7 TÚNEL DE VIENTO.....	38
1.7.1 Clasificación de los túneles de viento.....	38
1.8 APLICACIONES DEL TUNEL DE VIENTO	39
2. NORMATIVA	40
2.1 IMPORTANCIA DE LA NORMA.	40
2.2 NORMATIVA INTERNACIONAL ISO 5801:2007	41
2.3 NORMATIVA JAPONESA JIS B 8330:2000	42
2.4 NORMATIVA REFERENTE ASHRAE 51-07/AMCA 210-07.....	42
3. DISEÑO DEL TUNEL DE VIENTO BAJO LA NORMA ANSI/ AMCA 210-07.	47
3.1 Justificación y Dimensionamiento.....	47
3.1.1 Área de sección trasversal del túnel de viento	49
3.2 SEDIMENTADORES DE FLUJO.....	50
3.3 ARO PIEZOMÉTRICO Y TOMAS DE PRESIÓN.....	52
3.4 SECCIONES DEL TÚNEL DE VIENTO.....	53

3.5	BASE DE APOYO BANCO DE ENSAYOS.....	56
3.6	SOPORTE VENTILADOR DE PRUEBA.....	57
3.7	ESTRUCTURA SOPORTE TÚNEL DE VIENTO.....	58
4.	CONSTRUCCIÓN Y CALCULOS.....	62
4.1	CONSTRUCCIÓN.....	62
4.2	CONFIGURACIÓN BANCO DE ENSAYOS.	69
4.3	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.	71
4.4	DATOS ADQUIRIDOS.....	74
4.5	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.....	77
4.5.1	Densidad atmosférica.....	78
4.5.2	Densidad en la cámara.	78
4.5.3	Densidad en el ventilador.....	78
4.5.4	Viscosidad dinámica del aire.....	78
4.5.5	Caudal en la cámara de medición.....	78
4.5.6	Caudal del ventilador.....	79
4.5.7	Presión de velocidad.....	79
4.5.8	Presión total en condiciones de prueba:	80
4.5.9	Presión total ventilador.....	80
4.5.10	Potencia del ventilador.....	80
4.5.11	Eficiencia total y estática del ventilador.....	81
5.	EVALUACION DE UN VENTILADOR.....	82
5.1	Ventilador axial DC 1	83
5.2	Ventilador axial AC 1-6W.....	91
5.3	Ventilador axial AC 2-12W.....	94
5.4	Ventilador axial AC 3	96
5.5	Caracterización del refrigerador doméstico.	100
5.6	Análisis para la selección del ventilador.	101
	CONCLUSIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	ANEXOS.....	1

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen Propiedades Moto ventilador.	29
Tabla 2. Resumen de Propiedades de las Hélices.	30
Tabla 3. Normas equivalentes ANSI/ASHRAE 51-07.	41
Tabla 4. Boquillas De Medición disponibles.....	45
Tabla 5. Guía de Selección Norma ANSI/ASHRAE 51-07.....	46
Tabla 6. Resumen distancias mínimas sugeridas por la norma.....	60
Tabla 7. Componentes de la estructura soporte del Túnel de viento.....	62
Tabla 8. Resumen Medidas por secciones.....	68
Tabla 9. Sensor de Presión estática	72
Tabla 10. Sensor de presión diferencial.....	73
Tabla 11. Caudal de aire Máximo para cada una Boquillas de medición.....	73
Tabla 12. Lista de parámetros utilizados para los cálculos.....	75
Tabla 13. Datos Registrados de acuerdo a la configuración del túnel de viento....	77
Tabla 14. Condiciones ambientales de prueba	83
Tabla 15. Caracterización motoventilador Axial DC 1.....	83
Tabla 16. Mediciones boquilla 3.00"	84
Tabla 17. Mediciones boquilla 2.00"	85
Tabla 18. Mediciones boquilla 1.60"	85
Tabla 19. Mediciones boquilla 1.250"	86
Tabla 20. Mediciones boquilla 1.00"	86
Tabla 21. Mediciones boquilla 0.687"	87
Tabla 22. Mediciones boquilla 0.500"	87
Tabla 23. Mediciones boquilla 0.375"	88
Tabla 24. Caracterización motoventilador Axial AC 1-6W	92
Tabla 25. Caracterización motoventilador Axial AC 2-12W	94
Tabla 26. Caracterización motoventilador Axial AC 3.....	96
Tabla 27. Señal Eléctrica, Medidores de Presión	3

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Rango de Caudal de aire medible por diámetro de boquilla.....	74
Gráfica 2. Curva Característica Ventilador Axial DC 1 obtenida en el ensayo.....	89
Gráfica 3. Comparación de los ensayos obtenidos con el túnel de viento y la curva características reportada por el fabricante del ventilador Axial DC 1.....	90
Gráfica 4. Curva Característica Ventilador Axial AC 1-6W	93
Gráfica 5. Curva Característica Ventilador Axial 2-12W	95
Gráfica 6. Curva Característica Moto Ventilador Axial AC 3.....	98
Gráfica 7. Carta de Ventiladores de prueba y comparación por curva características.....	99
Gráfica 8. Comparación de potencia consumida por los Moto-Ventiladores de prueba.....	102
Gráfica 9. Comparación de las RPM por ventilador de prueba.....	102
Gráfica 10. Comparación nivel de ruido Por ventilador de prueba, reportada por el fabricante.....	103
Gráfica 11. Fracción de interés caudal de aire Nevera 244L, ventiladores de prueba.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clase de Ventiladores Axiales.	23
Figura 2. Clase de Ventiladores Centrífugos.	24
Figura 3. Clasificaciones de ventiladores por presión.....	25
Figura 4. Curvas Características de los Ventiladores.	26
Figura 5. Componentes Principales de un moto ventilador.....	27
Figura 6. Moto ventilador con hélices de plástico (izquierda) y lamina estampada (derecha).	28
Figura 7. Corrientes de aire frío circula en el refrigerador desde el serpentín al interior de un refrigerador frost free	31
Figura 8. Evaporador de tiro natural (natural draft) y evaporador de tiro forzado (Mechanical draft).	32
Figura 9. Flujo de aire desde la placa plana del evaporador hacia el compartimiento de conservación.	33
Figura 10 . Evaporador de tiro forzado.	34
Figura 11. Funcionamiento del condensador de tiro inducido.....	35
Figura 12. Interior de una Nevera <i>no frost</i> Samsung SR 320, configuración evaporador y ventilador.	36
Figura 13. Ensayo del funcionamiento del ventilador al interior del refrigerador doméstico.	37
Figura 14. Medición de la presión de velocidad y estática con el Tubo pitot.	43
Figura 15. Medición de la presión diferencial con Nozzles.	44
Figura 16. Tipo de instalaciones de acuerdo a la aplicación del ventilador.	46
Figura 17. Cámara de descarga, Configuración 12	48
Figura 18. Cámara de admisión, Configuración 15.....	49
Figura 19. Cámara túnel de viento.....	50
Figura 20. Sedimentador de flujo.....	51
Figura 21. Aro piezométrico (Izquierda) y Grifos presión estática (Derecha).....	53
Figura 22. Cámara de Admisión/Descarga.....	54
Figura 23. Cámara de pruebas.....	55
Figura 24. Zona de Descarga.....	55
Figura 25. Soporte Ventilador Auxiliar.	56
Figura 26. Base apoyo túnel de viento.....	57
Figura 27. Estructura Soporte Túnel de viento.....	59
Figura 28. Componentes mini Túnel de viento.....	61
Figura 29. Configuración 15, Banco de ensayos mini Túnel de Viento.....	71
Figura 30. Nevera 244L, Refrigerador de estudio.....	100
Figura 31. Sensor LP 1000 GE DRUCK, Catalogo comercial.....	22
Figura 32. Tacómetro TESTO 470, manual de operación.	23
Figura 33. Fuente Potencia Proteck.....	24
Figura 34. Termopar tipo punzón, grado T.	25
Figura 35. Ventilador Auxiliar Ebm-Papst, datos nominales.	26

Figura 36. Curva Característica Ventilador Auxiliar.	27
Figura 37. Ventilador de Prueba NMB eminebea, Ficha Tecnica	28
Figura 38. Termometro, Higrometro y barometro PCE-THB-38.....	29
Figura 39. Plano de Ensamble.....	31
Figura 40. Enderezador de flujo ensamble.	32
Figura 41. Estructura túnel de viento, ensamble.....	33

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PROCEDIMIENTOS PARA LA ELABORACION DE PRUEBAS	1
ANEXO B. MEDICIONES CON EL TÚNEL DE VIENTO	8
ANEXO C. ITERACIÓN PARA CALCULO NÚMERO DE REYNOLDS.....	20
ANEXO D. CONVERSIÓN A OTRAS DENSIDADES Y VELOCIDADES DE ROTACIÓN.....	21
ANEXO E. FICHA TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS MEDICIÓN	22
ANEXO F. FICHA TECNICA MOTO VENTILADORES POR REFRIGERADOR.....	29
ANEXO G. MANUAL DE SEGURIDAD.	30
ANEXO H. PLANOS DE ENSAMBLE BANCO DE ENSAYOS TUNEL DE VIENTO	31

LISTA DE FOTOGRAFIAS.

Foto 1. Distancia mínima entre mallas del Enderezador de flujo.	52
Foto 2. Hembra Soporte Ventilador Prueba.....	57
Foto 3. Macho Soporte Ventilador prueba.	58
Foto 4. Estructura soporte, Segundo nivel, ubicación de los Nozzles.....	63
Foto 5. Sección circular del Túnel de viento, diámetro interior.	64
Foto 6. Distancia entre el área de admisión y el enderezador de flujo.....	64
Foto 7. Cámara de Admisión.	65
Foto 8. Distancia entre planos de medición de presión diferencial.	65
Foto 9. Cámara de Prueba, ubicación Boquilla de medición.	66
Foto 10. Ubicación enderezador de flujo zona de descarga.	66
Foto 11. Instalación ventilador Auxiliar.	66
Foto 12. Ensamble de Secciones.	67
Foto 13. Banco de ensayos, Mini túnel de viento.....	68
Foto 14. Configuración 12, Banco de Pruebas mini Túnel de viento.	70
Foto 15. Sensor de presión GE DRUCK serie LP1000.....	72
Foto 16. Moto Ventiladores de prueba.....	82
Foto 17. Moto Ventilador Axial DC 1.....	84
Foto 18. Moto Ventilador Axial AC 1-6W, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas.	91
Foto 19. Datos de placa moto Ventilador Axial AC 1-6W.....	93
Foto 20. Moto Ventilador Axial AC 2-12W, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas	94
Foto 21. Moto Ventilador Axial AC 3, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas...	97
Foto 22. Datos de Placa, Refrigerador De Estudio	101

GLOSARIO

Aguas abajo (**downstream**): flujo en dirección de la corriente o punto que se sitúa después de la sección considerada avanzando en el sentido de la corriente.

Aguas arriba (**upstream**): en dirección contraria a la corriente o punto que se sitúa antes de la sección considerada contrario a la corriente.

Aire estándar: aire con una densidad estándar de 1.2 kg/m^3 (0.075 lbm/ft^3) a una presión barométrica (atmosférica) estándar de 101.325 kPa (29.92 in.Hg), una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 50%.

Aro piezométrico: serie de interconexiones de tomas de presión estática en un plano en común de una cámara de prueba de flujo de aire.

Boquilla de Medición (**Nozzles**): Elemento de medición y control de flujo basado en la variación del área de sección transversal donde usualmente se miden variables como caudal, velocidad, dirección, masa, presión.

Cámara de admisión (**inlet**): cámara de ensayos de caudal de aire con boquillas de medición dispuesta para la conexión de la entrada de un ventilador. La salida de la cámara está conectada a la entrada del ventilador. Figura 15 norma AMCA 210-07.

Cámara de descarga (**outlet**): cámara de ensayos de caudal de aire con boquillas de medición, dispuestas para la conexión a la salida o descarga del ventilador, la admisión de la cámara está conectada a la salida del ventilador. Figura 12 norma AMCA 210-07.

Compartimiento congelación: es apropiado para almacenar comida y productos para su congelación con una temperatura de trabajo de $+5^\circ\text{F}$ a -10°F (-15°C a -23.33°C) en condiciones normales de uso.

Compartimiento conservación: es apropiado para almacenar comida fresca y productos perecederos temperatura de trabajo 35°F a 40°F (1.66°C a 4.44°C) en condiciones normales de uso.

Descarga libre (**Free Delivery**): punto de operación donde la presión estática es cero y la descarga de caudal de un ventilador es máxima.

Enfriamiento dinámico (**Dynamic cooling**): hace circular el aire entre los alimentos manteniendo la temperatura uniforme. Aumenta la eficiencia del refrigerador.

Enderezador de Flujo (**Flow Straightener**): dispositivo de control de flujo, que tiene como fin direccionar el flujo que ingresa aguas arriba en el túnel de viento de manera desordenada y turbulenta en un flujo un poco más laminar aguas abajo.

Espacio confinado: Lugar que está determinado por un volumen de aire y tiene restricciones de entrada y salida.

Evaporador: intercambiador de calor cuyo interior fluye refrigerante, el cual cambia su estado de líquido a vapor, este cambio permite absorber calor sensible contenido alrededor de este aumentando el valor de su entalpía.

Fluido incompresible: Fluido cuya densidad no varía o permanece aproximadamente constante a lo largo del flujo sobre el curso de su movimiento y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo debido a una fuerza externa.

Fluido compresible: Fluido cuya densidad varía a lo largo del flujo en movimiento y puede reducir su volumen debido a una fuerza externa.

Grapa Rápida (**Toggle Clamp**): pieza para la sujeción de elementos o componentes, de fácil instalación y bajo costo, tiene la capacidad de sostener por medio de apriete.

Hub: Parte central o eje extremo interior de las palas que se encuentra en varios dispositivos, como un ventilador o una hélice.

Perilla de ajuste: es un elemento de ensamble compuesto por un tornillo roscado, una arandela o empaque de caucho, una tuerca tipo mariposa y un mango como cabeza, sirve para ajustar de una manera rápida secciones o partes de un equipo.

Plano de medición: área donde se establece condiciones de densidad, temperatura o velocidad de aire para la medición de presión ya sea diferencial o estática

Presión de velocidad: la presión necesaria para mantener en movimiento un flujo de aire, también es conocida como presión dinámica

Presión estática máxima (**Shut-Off**): punto de operación donde el caudal de descarga del ventilador es cero y la presión estática es máxima.

Presión estática: presión necesaria para vencer las fricciones que se presentan en ductos, conexiones y equipos.

Presión total: presión que posee un fluido en virtud de su movimiento necesario para vencer las pérdidas por presión.

Refrigeradores no frost (**Household Frost-Free Refrigerating**): sistema en el cual la refrigeración es proporcionada por la circulación de aire forzado y el

evaporador se descongela por un sistema automático. No requiere de descongelación, ni presenta acumulación de escarcha en las superficies internas del artefacto, el agua de descongelamiento se evacua automáticamente

Reynolds: número a dimensional que relaciona las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas de un fluido. También define si este es laminar o turbulento.

TIP: Punto final o extremidad, que se encuentra especialmente ubicada al final de la longitud de cuerda de una aspa o cuchilla de un ventilador.

Tiro forzado: se dice que un elemento es de tiro forzado cuando se requiere de un flujo de aire inducido por un elemento mecánico en este caso un ventilador.

Tiro natural: utiliza el efecto natural de presiones, aprovechando la ventaja del efecto de empuje de Arquímedes que sufren los gases calientes rodeados por otros más fríos y diferencia de densidad para inducir un flujo de aire.

Unidad de refrigeración: Se refiere el conjunto de compartimientos de un refrigerador domestico compuesto por el compartimiento de conservación y de congelación.

Ventilador: dispositivo que utiliza potencia de rotación para mover gas o aire, la energía incrementada por el ventilador tiene un límite máximo de 25 kJ/kg aproximadamente equivalente a 30kPa para la norma AMCA 210-07.

ABREVIATURAS

Pa: Pascales.

CM: Cámara de Medición.

Outlet: descarga.

Inlet: admisión.

SVA: Soporte Ventilador Auxiliar.

SN: Soporte Nozzles (Boquilla).

PL.: Plano de medición.

Vaux. : Ventilador Auxiliar.

N.A: No aplica.

E.F: Enderezador de flujo.

Dven. : Diámetro Ventilador Prueba.

Ps: Presión estática.

SO: Shut off.

FD: Free delivery.

Qcon: Caudal de aire al interior del Congelador

Qref: Caudal de aire al interior del conservador o gabinete de refrigeración.

Qtot: Caudal Total al interior del refrigerador doméstico.

RESUMEN

El diseño y la construcción de un banco de ensayos tipo túnel de viento capaz de realizar la medición de la curva característica de un ventilador utilizado en el refrigerador doméstico en función del caudal de aire y la presión estática generada son descritos en este trabajo de grado. Inicialmente se realiza una recapitulación de los conceptos generales que rigen la caracterización de los ventiladores tales como: clasificación, importancia de la curva característica, propiedades y funcionamiento del Motor-ventilador al interior del refrigerador doméstico. También se recopila la información sobre la clasificación e implementación del túnel de viento para el análisis de fluidos.

Posteriormente, se hace una revisión de la normativa para esta clase de bancos de ensayos y los métodos de prueba aerodinámico de los ventiladores, con una regulación que varían de acuerdo a los estándares internacionales en función del tipo de medición y la clase de instalación empleada. Seleccionando a la norma ANSI/ASHRAE 51-07 como la norma referente, ya que es la normativa más reciente y la de mayor implementación a nivel mundial. Como esta norma sugiere, 16 clases de configuraciones, con cuatro tipos de instalaciones se optó por la configuración más próxima a las condiciones de trabajo del ventilador al interior del refrigerador doméstico y al tipo de medición que proporcione mejor calidad en la obtención de datos.

El banco de ensayos construido es capaz de medir un caudal de aire hasta de 516,14 metro cubico por hora (303,79 CFM) y una caída de presión no mayor de 625 Pa, estas condiciones referentes para el aire estándar a una presión atmosférica de 101.325 kPa, a 20°C y una humedad relativa del 50%. Este rango de operación permite evaluar los Moto-ventiladores con un diámetro de descarga de hasta 144 mm, los cuales son los ventiladores de mayor diámetro implementados en los refrigeradores doméstico.

Finalmente, se evalúan en el túnel de viento cuatro tipos moto-ventiladores utilizados en los refrigeradores domésticos, obteniéndose, con las mediciones, una serie de puntos de operación para la determinación de la curva característica de cada ventilador en función del caudal y la presión estática. Además se realizó un análisis comparativo entre las curvas características para dos ventiladores del mismo fabricante con diferentes potencias. Posterior a esto se realiza una caracterización de una Nevera de 244 litros y un análisis para la selección del ventilador más óptimo para esta clase de refrigerador doméstico. Se redacta en el anexo el procedimiento utilizado para la implementación del túnel de viento.

Palabras Clave: Túnel de viento; Ventiladores; Motor polo sombreado; Normativa; Curvas características; Refrigeradores domésticos; Flujo de aire.

INTRODUCCIÓN

Los ventiladores en la refrigeración doméstica tienen como propósito principal la dosificación del aire al interior de los gabinetes, promoviendo una buena distribución del frío y permitiendo la renovación del aire. En las neveras, además de facilitar el flujo de aire seco, permiten la extracción de olores indeseables y de microorganismos presentes, facilitando la conservación de alimentos que mantienen sus actividades fisiológicas, como los vegetales.

Los ventiladores en el sistema de refrigeración representan una fuente de consumo de energía, debido a que requieren de trabajo eléctrico para su funcionamiento; esto implica un uso eficiente de este dispositivo en refrigeradores domésticos. En el mercado actual existe una gama amplia de diferentes tipos de ventiladores, que varían desde su tamaño, modo de rotación, fabricante, velocidad, potencia, características especiales en el diseño de sus aspas, entre otros. Sin embargo no se puede olvidar que su buen desempeño no sólo depende del mismo, sino del sistema de refrigeración y por lo tanto, debe ser evaluado en conjunto con el tipo de refrigerador doméstico, por ejemplo, con la capacidad de carga equivalente al volumen de aire que se requiere dosificar.

La selección del ventilador y la puesta a punto de este subsistema en los refrigeradores domésticos se realiza de una forma empírica, lo que no permite una selección adecuada y restringe la capacidad de evaluación correcta para realizar una retroalimentación de este subsistema. Un método utilizado para la selección de ventiladores a partir de la curva característica del ventilador es la identificación del punto de operación con el sistema. Por ello se implementó como objetivo general: “diseñar un banco de ensayos tipo mini túnel de viento con la capacidad de evaluar las características inherentes del sistema para la selección del ventilador más adecuado al interior de un sistema de refrigeración doméstica”. A partir de esos criterios de evaluación y con las pruebas a realizar se desea mejorar los sistemas de refrigeración durante el proceso de diseño para obtener refrigeradores que generen menos ruido y que consuman menos energía.

Durante el proceso de investigación de los antecedentes y la identificación de los componentes, se propuso como objetivos específicos realizar una caracterización del tipo de refrigerador usado en el ensayo, donde se especifica: tipo de nevera, capacidad interna, temperatura de trabajo. Además de evaluar las variables relevantes en la caracterización de ventiladores al interior de los refrigeradores tales como tamaño, potencia, nivel de ruido entre otros.

También, mediante el diseño conceptual de un banco de ensayos, desarrollar un mini túnel de viento bajo la norma ANSI/AMCA 210-07 capaz de construir las curvas características Presión vs Caudal del ventilador. Con la ayuda del software

de diseño en 3D SOLID EDGE®, además de elaborar los planos de taller para la construcción de la piezas del túnel de viento. Posteriormente, se realizó un compendio de los instrumentos de medición para el análisis de las variables principales del ventilador. Finalmente se definió los esquemas de montajes y el procedimiento adecuado para la realización de los ensayos y la obtención de datos para la configuración implementada en el túnel de viento.

Para llevar a cabo este proyecto la metodología consta básicamente de cuatro fases principales: diseño básico, diseño de detalle, construcción y comunicación del diseño.

El diseño básico constituye la primera fase, la cual consiste en la recopilación de toda la información necesaria, para entender el funcionamiento e importancia de los ventiladores en los sistemas de refrigeración y las aplicaciones del túnel de viento, como un análisis exhaustivo de la normativa que estandariza a nivel internacional estos procedimientos.

Con la información obtenida se procede a realizar un análisis de diversos elementos que se van a integrar a los componentes del mini túnel de viento a realizar, de manera que permitan un funcionamiento adecuado de los subsistemas en desarrollo. Con base en opciones disponibles, se hará una comparación, según los parámetros de mayor importancia para, de este modo, satisfacer las exigencias previstas. Consecuente a esto se procede al diseño de detalle, fase en la cual se van a realizar los cálculos pertinentes para el dimensionamiento, diseño de elementos y subsistemas. Se seleccionan los equipos y elementos de medición, modelación virtual en CAD y la elaboración de planos de taller para su manufactura.

En la tercera y cuarta fase se llevó a cabo la construcción y el ensamble de cada subsistema. Se realizaron pruebas y ajustes a los diferentes componentes para el diseño base con la que se obtuvo una retroalimentación y se realizó los ajustes finales para obtener el diseño definitivo del proyecto.

Al final de esta obra se anexo un formato para la elaboración de los ensayos en adición a las pruebas estándar exigidas por la normativa, complementarios de esta misma, que contiene el análisis para la validación de los ensayos y las conclusiones de estas pruebas.

1. CONCEPTOS GENERALES

Este capítulo consta de la recopilación de los antecedentes referente en una primera parte define aspectos relacionados con los ventiladores como: la clasificación, curva característica y la caracterización del tipo de ventilador usado en las neveras, en un segunda parte se realiza un prelude a los refrigeradores domésticos y los sistemas que lo componen, finalmente una introducción al funcionamiento, clasificación y aplicación del túnel de viento.

1.1 PRELIMINAR

El ventilador es una maquina rotativa que tiene como finalidad ejercer trabajo para mantener un fluido compresible o incompresible en movimiento y provocar su desplazamiento, mediante el efecto conseguido por el aumento de la presión a través del mismo; además posee características inherentes a las propiedades del fluido que dispone, en este caso aire. [1] [2]

En un refrigerador doméstico, los sistemas de ventiladores tienen como propósito general promover y distribuir en el ambiente interior del recinto el aire para homogenizar su temperatura y humedad, a niveles adecuados controlando la tasa de transferencia de calor. Como una función paralela debe estimular la salud, el confort y el bienestar permitiendo renovar y extraer el aire al interior de una cabina al sustituirlo con el aire del exterior, disminuyendo las impurezas, eliminar los malos olores, garantiza el control del crecimiento de los microorganismos y brinda durabilidad a los alimentos. [3].

Para los refrigeradores domésticos, el flujo es inducido por un ventilador que dirige el aire frío desde la cámara del evaporador, donde se distribuye a los compartimientos por unos conductos, este aire que retorna se mezcla en el compartimiento de conservación más caliente, regresada al evaporador cerrando de este modo el ciclo. La presión generada por el ventilador en el interior debe ser suficiente para contrarrestar la caída de presión impuesta por el circuito, además la cantidad el flujo de aire que circula debe tener una óptima capacidad de enfriamiento y mejorar la eficiencia del ventilador.

Como consecuencia, son aspectos relevantes conocer las características del ventilador, las propiedades inherentes de la unidad de refrigeración y realizar pruebas de funcionamiento permitiendo conocer el comportamiento y punto de operación óptimo de ambos. La cantidad de aire óptima puede ser definida como

el aire libre de contaminantes que causen deterioro y permitan la dilución de la concentración de los gases como la provisión de oxígeno y el control del calor para los productos al interior del refrigerador, controlando la temperatura. A continuación conoceremos las características principales relacionadas con este fenómeno, dependiendo si tiene empuje natural o empuje mecánico y empezando por las clasificaciones de los ventiladores. [4] [5]

1.2 CLASIFICACIÓN DE VENTILADORES

Existen tres tipos principales de ventiladores utilizados a nivel industrial: axiales, centrífugos (Radiales) y de flujo cruzado (Tangencial). Según sus características, los ventiladores proporcionan diferentes beneficios, primordialmente en la dirección y velocidad del flujo. Además son máquinas destinadas para crear corrientes de aire que tiene como característica crear un caudal volumétrico, un incremento de la presión estática, disponer de una potencia, y modo de arrastre. [6]

1.2.1 Ventiladores Axiales.

La entrada y salida del aire sigue una trayectoria según superficies cilíndricas coaxiales, son utilizados en diversas aplicaciones como la ventilación de locales ofreciendo ventajas por su facilidad de instalación y cambio del sentido de giro. También se aplican para enfriamiento de equipos electrónicos, aplicaciones de grandes tamaños como aeronave, túneles de viento y minería; la sub clasificación de los ventiladores axiales se divide en [7] [8]:

1.2.1.1 Ventiladores axiales helicoidales.

Aptos para mover grandes caudales de aire con bajas presiones pero de bajo rendimiento. La transformación de energía se produce en forma de presión dinámica. Tiene aplicación en la extracción de aire en naves industriales y, en recintos, se instala en la pared con objeto de renovación de aire.

1.2.1.2 Ventiladores tube axiales.

Tiene un rendimiento superior a los axiales helicoidales y son capaces de desarrollar una presión estática mucho mayor que el anterior. Por su robustez es idóneo para intercalar en conductos, se utiliza en instalaciones de ventiladores, calefacción y aire acondicionado que requieran altos caudales con presión media a baja.

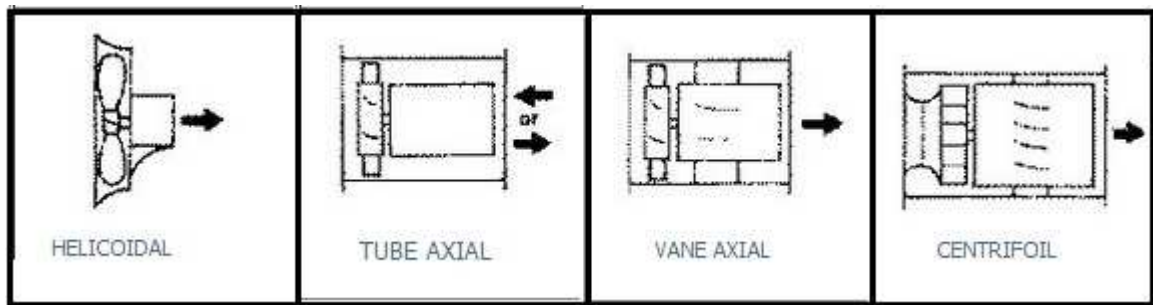
1.2.1.3 Ventiladores vane axiales.

Permiten obtener presiones medias y altas con buenos rendimientos según el diseño de hélices. Las cuales pueden ser fijas o de ángulo ajustable y se utilizan en sistemas industriales como cabinas de pintura, extracciones localizadas de humos o sistemas que requieran altos caudales de aire, con flujos más uniformes y altas presiones. En determinados medios de trabajo pueden ser más pequeños que algunos ventiladores centrífugos equiparables.

1.2.1.4 Ventiladores CentroFoil.

Consiste en un ventilador con rotor centrífugo pero de flujo axial, es decir reúne las ventajas del ventilador centrífugo y la facilidad de montaje de un axial con el consiguiente ahorro de espacio, tiene aplicaciones similares a los ventiladores Vane axiales.

Figura 1. Clase de Ventiladores Axiales.



Fuente: Chicago Blower Argentina disponible en http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm. Consultado el 10 junio 2014

La principal característica entre estos tipos de ventiladores es que sus aspas inclinadas con relación al eje de rotación giran simulando el movimiento de un tornillo, logrando de esta manera el movimiento del aire y aumentando su velocidad de acuerdo a la rotación de las aspas [2].

1.2.2 Ventiladores centrífugos.

El ventilador centrífugo está constituido por un rodete equipado de una serie de alabes o turbinas, que gira dentro de una carcasa en forma de caracol; tiene dos bocas, una de aspiración y otra de impulsión, abierta tangencialmente en relación al rodete. La fuerza centrífuga creada por la rotación de la turbina es dirigida por los alabes que impulsan el aire y lo expulsan en su entorno, donde lo recoge la

voluta y lo lleva al orificio de salida. El retiro del fluido genera cierta depresión en la boca de aspiración.

Los ventiladores centrífugos son frecuentes en la industria, se aplican en la construcción de maquinaria de ventilación y recirculación de gas caliente, calderas, extraer polvo entre otros. Los ventiladores centrífugos se diferencian de los demás, debido a que el fluido entra en el impulsor axialmente y sale radialmente.

Los alabes de los rodets de los ventiladores centrífugos pueden ser curvados con inclinación mayor a 90 grados hacia adelante donde el crecimiento de la presión depende del aumento del caudal; en los alabes de salida radial (ángulo de 90 grados) la presión permanece constante al incrementar el caudal y en los alabes curvados con inclinación menor a 90 grados hacia atrás, la presión disminuye al incrementar el caudal, los ventiladores centrífugos air foil se caracterizan por tener perfiles aerodinámicos y autolimitación de la potencia se utiliza aplicaciones industriales de sistemas de aire acondicionado, asimismo encontramos ventiladores centrífugos tipo radial tip, sus hélices son curvas hacia delante, auto limpiantes y es utilizado en aplicación industriales con movimiento de material .

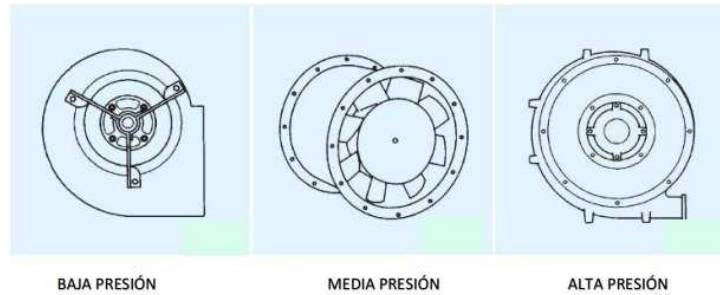
Figura 2. Clase de Ventiladores Centrífugos.



Fuente: Chicago Blower Argentina disponible en http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm. Consultado el 10 junio 2014

Otra forma de clasificación de los ventiladores se basa en la presión que desarrolla en su funcionamiento: ventiladores de baja presión que suelen ser centrífugos y con diferenciales de presión inferiores a 70 Pa para aplicaciones de climatización, ventiladores de media presión con un diferencial de presión mayor a 70 Pa e inferiores a 3000 Pa que son centrífugos o axiales y ventiladores de alta presión con diferenciales de presión mayores a 3000Pa los cuales son usualmente Centrífugos con rodets estrechos y de gran diámetro [7].

Figura 3. Clasificaciones de ventiladores por presión.



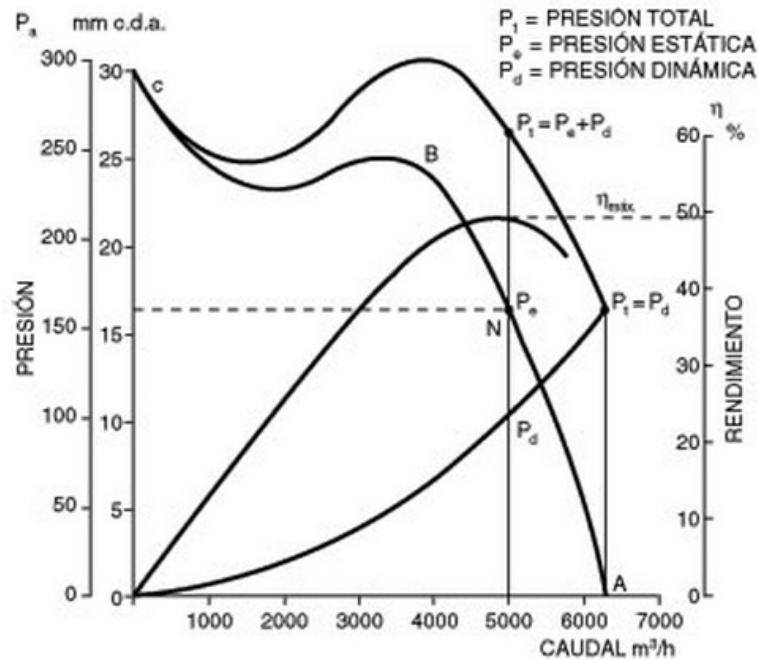
Fuente: Clasificación, según la presión desarrollada, C. A. URIBE B, Notas de clase: Ventiladores del curso de fluidos 2, facultad de ingeniería mecánica, U.P.B; Medellín 2013. Consultado el 10 julio del 2014

1.3 CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS VENTILADORES

El ensayo de ventiladores tiene por objeto determinar la capacidad del ventilador para transferir potencia al aire que mueve. Estos datos son obtenidos mediante ensayo en un laboratorio a una temperatura, presión atmosférica y humedad específica. La curva obtenida es representada en un gráfico con unos ejes ordenados, en donde se puede identificar los distintos valores de los parámetros físicos importantes, para el funcionamiento del ventilador, en estos gráficos se pueden representar en diferentes escalas, variables como: la presión, el Caudal, la velocidad de giro, eficiencia, potencia, nivel de ruido entre otros.

En estos ensayos se hace funcionar el ventilador a un régimen de giro constante, tomando valores desde el caudal máximo que se entrega (descarga libre), hasta el caudal cero (máxima pérdida por carga), con base a la condición de pérdida de caudal, se pueden establecer ciertos elementos como reguladores de flujo (boquillas) o generadores de contra flujo (Ventiladores auxiliares) para realizar mediciones a diferentes caudales. En la figura 4 se muestra un diagrama con cuatro curvas características, en las cual se han graficado: el rendimiento (N), la presión dinámica (P_d), que actúa en el sentido de la velocidad del aire, la presión estática (P_e), que representa las pérdidas de carga y la presión total (P_t) siendo igual a la suma de presión estática y dinámica en función del caudal (Q). Además se debe incluir las mediciones de las condiciones ambientales como presión atmosférica y humedad relativa.

Figura 4. Curvas Características de los Ventiladores.



Fuente: Soler y Palau S&P México, disponible en <http://www.solerpalau.es/es-es/hojas-tecnicas-clasificacion-de-ventiladores/>. Consultado 21 Junio 2014

Las curvas características de un ventilador indican su comportamiento según sea su funcionamiento, y normalmente son reportadas por los fabricantes en sus catálogos [9], pues reúnen la información necesaria para determinar las magnitudes de operación de la máquina en una determinada instalación. Estas son obtenidas para condiciones ambientales específicas y además requieren de procedimientos y equipos según la normativa oficial por la que se evalúa el ventilador, es común ver aparatos de ensayos, como lo son túneles de viento y cámaras calibradas. Algunas estandarizaciones comunes son las normas americanas AMCA/ASHRAE 210-07/51-2007 y sus equivalentes ISO CD 5801: 2007 o británicas BS 848 parte 1 [10].

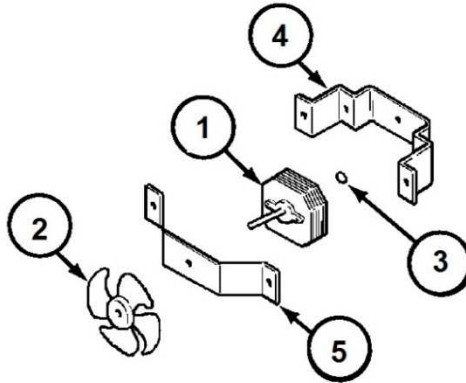
Debido al desplazamiento del aire y al movimiento de las hélices a una velocidad giro, el ventilador genera determinado ruido que se debe tener en cuenta para el confort de las personas que se encuentra cercanas al funcionamiento del equipo, estos valores se determinan mediante medidas de nivel, de presión y potencia sonora obtenidas en campo y se expresa en dB.

1.4 MOTO VENTILADORES.

En los refrigeradores domesticos de tiro forzado es común ver dos tipos de ventiladores; uno para el condensador y otro para el evaporador [11]. En ambos casos Los ventiladores utilizados por lo general son de hélice intercambiable con motores de polo sombreado. Que típicamente son motores de inducción monofásicos simple., Iguualmente se pueden utilizar pequeños ventiladores de corriente directa o ventiladores centrífugos tipo jaula de ardilla poco comunes en el evaporador.

En la figura 5 podemos observar, los componentes principales del ventilador de un refrigerador domestico ubicado en el evaporador tales como: el motor (1), aspas o hélice (2), elementos de unión y amortiguadores (3) y una base (4 y 5).

Figura 5. Componentes Principales de un moto ventilador.



Fuente: *Freezer compartment parts*, appliancepartspros disponible en: <http://www.appliancepartspros.com/04-freezer-compartment-parts-for-maytag-ptb195lgrw.html> consultado el 10 enero 2014

El ventilador del evaporador utilizado en modelos sin escarcha (**free frost**) comúnmente suelen ser axiales o tube-axiales, puede funcionar de manera continua, exceptuando en los periodos de descongelación, por lo que tiene altas horas de funcionamiento por varios años, debe ser dispositivos confiables y se ubica en el evaporador, usualmente debajo del panel, para que se pueda desmontar. A menudo tiene un motor de tipo abierto sin cubiertas sobre los devanados, y cojinetes lubricados permanente. En la siguiente figura vemos algunos de las versiones comerciales:

Figura 6. Moto ventilador con hélices de plástico (izquierda) y lamina estampada (derecha).



www.nbleader.cn

Fuente: *Evaporator fan motor*, Ningbo Leader Eléctrica Corp. disponible en <http://www.nbleader.cn/viewproduct.aspx?id=665> consultado 04 Septiembre 2014.

El ventilador del condensador se ubica en la parte inferior del refrigerador y por lo general es un motor de polo sombreado, con ventilador axial de hélice, asimismo son lubricados permanentemente pero a diferencia de los anteriores está cubierto. No es el alcance de este trabajo de grado definir la selección de este ventilador.

Figura: Moto ventilador condensador



Fuente: Tecnología de refrigeración y aire acondicionado 6ed. Bill whitman y otros.

La potencia se genera por un motor asíncrono monofásico con polo sombreado, es pequeño, robusto, económico y necesita poco mantenimiento. La potencia de salida oscila entre 1 y 50 W (0.001 a 0.07 HP), y el motor permite ser diseñado para dos o más velocidades, igualmente su rotación puede ser en sentido horario (**CW**) o en sentido anti horario (**CCW**). La temperatura de operación puede variar según el fabricante pero se encuentra en un rango entre -30°C a 50°C. Algunos proveedores son: Avail, Emerson Climate technologies, Ningbo Leader Electrical Corp entre otros. En la tabla 1 se muestra un resumen de las propiedades de estos motores.

El empuje transferido lo producen unas aspas helicoidales, que por lo general son de plástico como el Nylon 6 que le brindan excelente resistencia mecánica y térmica, fácil fabricación y suave acabado. También se utilizan láminas de metal estampado. Sus parámetros dimensionales varían según su diseño: con un diámetro mayor de aspa (**tip**) en un rango de 3.85" a 4.55" (97.79 mm a 114.3 mm), el ángulo de ataque permite compensar el gradiente de velocidad desde el diámetro interior base (**hup**) hasta la punta externa, su rango se encuentra entre 20° a 45°. Otro aspecto importante es el número de aspas. Estas propiedades de diseño pueden afectar directa o indirectamente la capacidad inherente del ventilador como la presión estática y el caudal volumétrico del gas que impulsa [12]. En la tabla 2 se puede identificar las propiedades dimensionales de las hélices intercambiables.

Una forma de determinar correctamente el funcionamiento del ventilador en operación es mediante la generación de las curvas características del ventilador, ensayo que se realiza en el túnel de viento.

Tabla 1. Resumen Propiedades Moto ventilador.

Elemento	Potencia [W]	Voltaje [V]	Rpm	Frecuencia [Hz]	Ruido [dB]	Horas de vida [Hr]	Protección IP	Temperatura de servicio [°C]
Motores de polo sombreado	1-50	110-120	2400 - 2900 ±200	50-60	35 Max.	50000	65 ≥	-30 a +50

Fuente: Ficha en Resumen de propiedades suministrada por HACEB®

Tabla 2. Resumen de Propiedades de las Hélices.

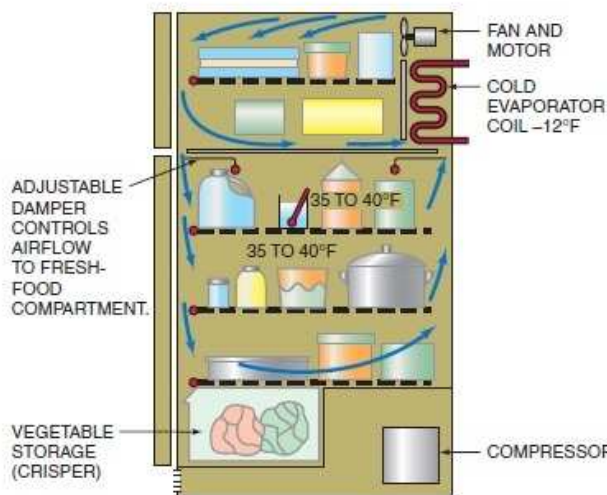
Elemento	Número de aspas	Diámetro exterior (tip) [mm]	Angulo de ataque [deg]	horas de vida aproximada [Hr]	Material
Hélice	3-5	97.79 -114.3	20-45	50000	Nylon 6

Fuente: Ficha en Resumen de propiedades suministrada por HACEB®

1.5 REFRIGERADORES DOMESTICOS.

La refrigeración tiene como propósito mover calor de un lugar de menor temperatura (deposito refrigerado) a otro de mayor temperatura (ambiente) a partir de un trabajo de entrada. En estado estacionario, el calor retirado equivale al calor que ingresa al refrigerador a través de sus paredes por conducción, convección y por los alimentos colocados en su interior. La unidad de refrigeración doméstica es un dispositivo que se conecta a una red eléctrica por lo general 110-120V, se fabrica mediante configuraciones de puertas distintas tipo lado-lado, arriba y abajo o de una sola puerta. Dependiendo de estas configuraciones se permite tener más espacio o brindar más funciones según sea el caso. Además, en su interior figura 6, se observa como el ventilador hace circular aire del refrigerador a través de un serpentín frío, el aire cede calor latente al serpentín y ocurre la deshumidificación [11]

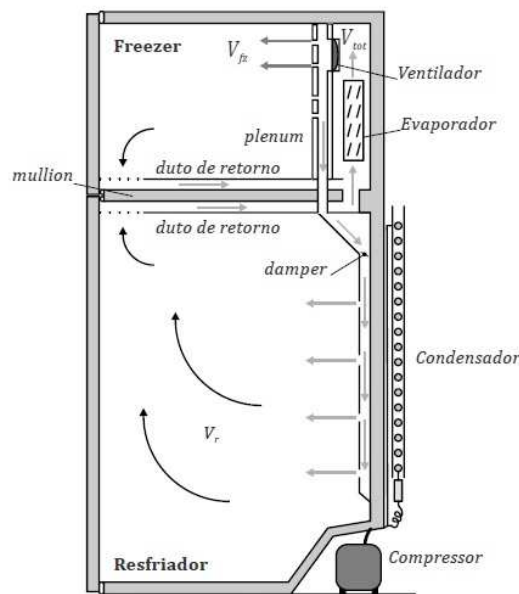
Figura 6. Transferencia de calor del aire al serpentín.



Fuente: *Refrigeration and Air Conditioning 7ed*, BILL WITHMAN y otros; Capítulo 45 *Domestic refrigerators and freezers*, pág 1336.

Cuando el aire ha cedido el calor, este se distribuye de nuevo en el refrigerador a una temperatura más fría en la figura 7 se puede observar la corriente de aire que circula al interior de refrigeradores no frost, de esta manera se pueda absorber el calor y la humedad de los productos en su interior. Este proceso continua hasta que se alcance una temperatura interior deseada en el compartimiento de conservación la temperatura habitual es de 35°F a 40°F (1.66°C a 4.44°C).

Figura 7. Corrientes de aire frío circula en el refrigerador desde el serpentín interior de un refrigerador **frost free**.



Fuente: *Um estudo in-situ da formação de Geada em Evaporadores No-frost*, KNABBEN F. pag.3.

Esta temperatura corresponde a la temperatura promedio del aire de retorno en dirección del serpentín, todo esto bajo condiciones comunes de un refrigerador doméstico ubicado en una residencia, si el refrigerador se encontrara a condiciones de verano o invierno algunos valores de la temperatura del aire de retorno variarán.

1.5.1 Evaporador.

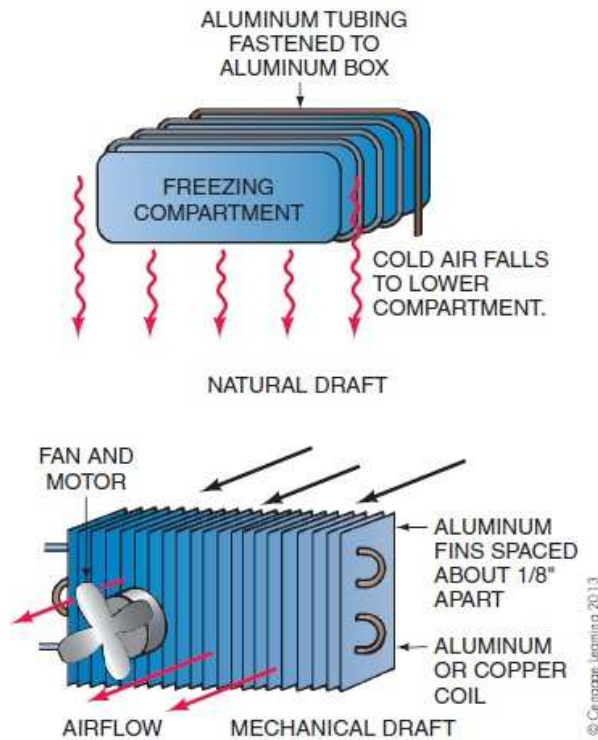
El evaporador de un refrigerador domestico absorbe el calor hacia el sistema de refrigeración, de este modo debe estar más frío que el aire en unidad refrigerada. En las aplicaciones comerciales comunes, sólo hay un compartimiento para conservar los alimentos congelados y otro por separado para los alimentos frescos como frutas, verduras, lácteos entre otros. El refrigerador contiene estos compartimientos en una sola unidad de refrigeración y Por lo tanto, el compresor

funcionara en las condiciones que requiera el compartimiento con menor temperatura que usualmente se encuentra en el rango de -10°F a $+5^{\circ}\text{F}$ (-23.33°C a -15°C).

Como también se requiere que funcione a la temperatura del compartimiento de conservación, se produce una corriente de aire, permitiendo que parte del flujo se direcciona desde la cámara de congelación hacia la de refrigeración, favoreciendo la buena transmisión del frío y homogenización de la humedad. Este requerimiento puede llevarse a cabo con una serie de evaporadores conectados de acuerdo a la temperatura que se requiera.

Los evaporadores suelen ser de dos tipos (figura 8): de tiro natural o tiro forzado. Un uso eficiente del ventilador mejora la eficiencia del evaporador, permitiendo instalar un evaporador de menor tamaño.

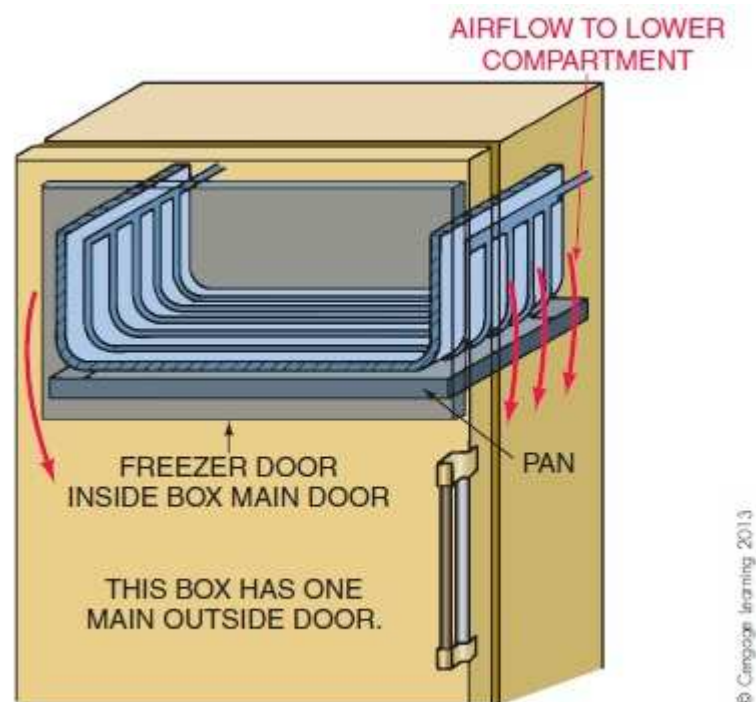
Figura 8. Evaporador de tiro natural (***natural draft***) y evaporador de tiro forzado (***Mechanical draft***).



Fuente: *Refrigeration and Air Conditioning 7ed*, BILL WITHMAN y otros; Capítulo 45 *Domestic refrigerators and freezers*, pág 1347.

El evaporador de tiro natural es del tipo placa plana con los conductos del refrigerante estampados en la placa, son efectivos desde el punto de vista de la transferencia de calor y requiere corrientes de aire natural para la distribución del frío. Como se muestra en Figura 9, el aire de la parte inferior y de los laterales puede fluir hacia el compartimiento de conservación.

Figura 9. Flujo de aire desde la placa plana del evaporador hacia el compartimiento de conservación.

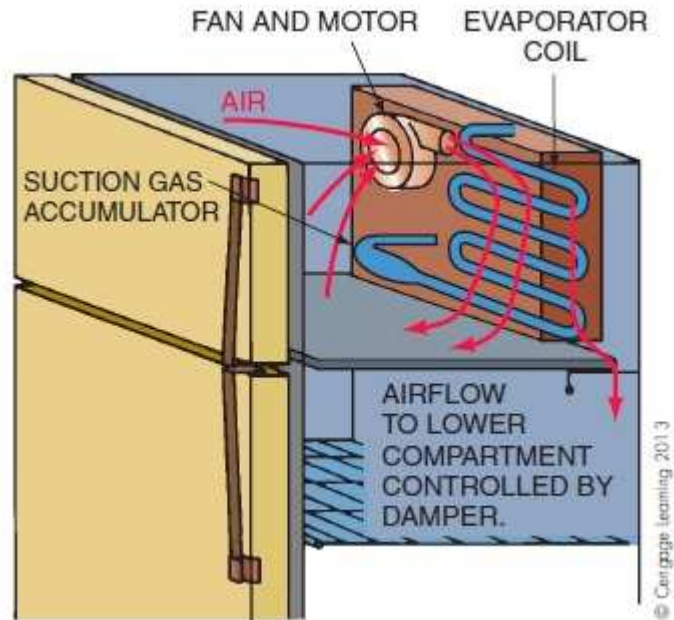


Fuente: *Refrigeration and Air Conditioning 7ed*, BILL WITHMAN y otros; Capítulo 45 *Domestic refrigerators and freezers*, Pág. 1348.

En los evaporadores de tiro forzado se utilizan un serpentín con ventilador, su ventaja radica en la reducción del espacio ocupado y suelen estar empotrados en el gabinete de congelación. Posee un conducto de aire que direcciona el flujo de aire frío y que es regulado mediante un **dámper** o válvula de regulación. Se compone de tubos de aluminio que pueden tener aletas para aumentar su área superficial; las aletas están bastante separadas para NO permitir acumulación de

escarcha, previniendo el mal funcionamiento del ventilador. Cada fabricante tiene su propia manera de sujetar el evaporador y moto ventilador. En la figura 10 se esquematiza su funcionamiento.

Figura 10 . Evaporador de tiro forzado.



Fuente: Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado 6ed, WILLIAM C WHITMAN y otros. Capítulo 3 Neveras domésticas, pág. 63

La mayoría parte de los evaporadores disponen de un acumulador, que permiten que el evaporador funcione a la máxima cantidad de líquido refrigerante y también protege al compresor, permitiendo que se acumule líquido y que se evapore para convertirse en vapor. En algunos modelos utilizan sistemas de descongelación automática y manual, la descongelación manual requiere que la unidad se apague y que la puerta del refrigerador se deje completamente abierta. El modelo automático puede trabajar con resistencias eléctricas o se puede utilizar el agua que se almacena en el evaporador para ser retirado por el compresor y condensador.

1.5.2 Compresor.

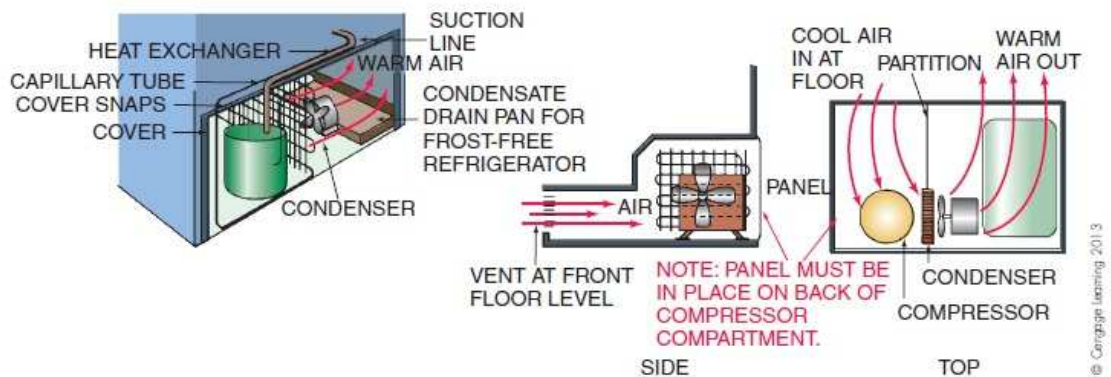
Hace circular el refrigerante que viene del evaporador donde este remueve calor a baja presión y la bombea hacia el condensador como vapor sobre calentado a una mayor presión.

Su potencia varia de 1/10 -1/3 HP, con tubería de aspiración y conductos de descarga, además tiene conductos de enfriamiento para aceite. Los compresores de los refrigeradores domésticos son del tipo soldado, herméticamente sellados, son compresores de desplazamiento positivo y pueden utilizar una acción de bombeo de tipo rotativo o alternativo, utiliza corriente alterna a 120V y 60Hz estándar para Colombia.

1.5.3 El condensador.

Son los disipadores de calor, estos son enfriados por aire, mediante la convección natural o bien mediante ventiladores pequeños por aire forzado. Los condensadores de tiro natural requieren de un espacio para que el aire fluya libremente y se encuentra en la parte posterior del refrigerador, en comparación con los condensadores de tiro forzado, como se observa en la figura 11, los cuales normalmente se ubican debajo del refrigerador y por lo general, en la parte posterior del refrigerador se encuentra la entrada de aire, y es por un costado de la parte frontal de donde se ubica la salida de tal forma que se cree un patrón de flujo del aire

Figura 11. Funcionamiento del condensador de tiro inducido.



Fuente: *Refrigeration and Air Conditioning 7ed*, BILL WITHMAN y otros; Capítulo 45 *Domestic refrigerators and freezers*, pág 1354.

1.6 VENTILADORES EN REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

Los ventiladores en los refrigeradores domésticos se componen de un motor ventilador, el cual genera un flujo de aire desde la cámara del evaporador y lo direcciona a través de canales principalmente hacia el compartimiento de congelación y seguido al compartimiento de conservación, en la figura 12 se puede identificar la ubicación del ventilador.

Esta ventilación se utiliza para dos propósitos, el primero es la renovación del aire que consiste en tomar aire del exterior, e introducirlo en el compartimiento, expulsando al mismo tiempo un volumen igual de aire viciado. Los diferentes módulos de refrigeración cuentan con ventiladores en algunos casos tipo swing motor y salidas multi-flujo [13], renovando el aire al interior del gabinete de refrigeración cada vez que se abra la puerta. El segundo propósito es la dosificación del aire mediante una adecuada circulación de flujo de aire a través de la cámara de congelación y refrigeración, con el fin de obtener una buena remoción del calor, una eficiente distribución de la temperatura y una homogenización de la humedad relativa al interior del refrigerador y, en algunos casos como las neveras tipo “no frost”, donde hay un flujo de aire seco con el fin de no generar escarcha en gabinete de congelación.

Figura 12. Interior de una Nevera *no frost* Samsung SR 320, configuración evaporador y ventilador.

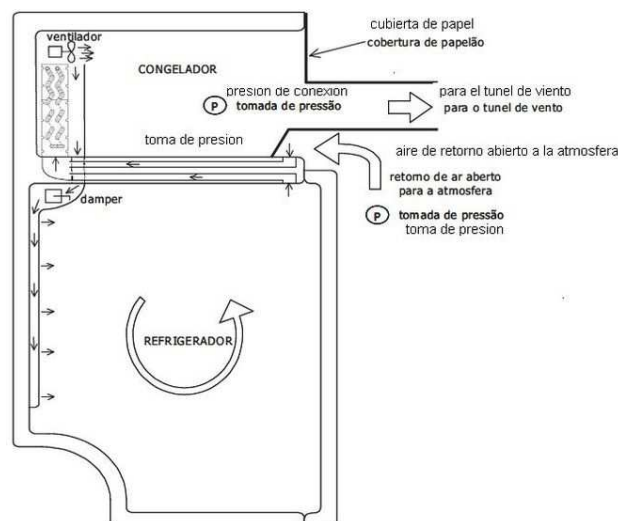


Fuente: http://linea-blanca.yoreparo.com/refrigeracion/1227078_0.html.
Consultado el 01 Abril 2014.

La ventilación inicia por el ventilador ubicado detrás del compartimiento de congelación y dosificado por una válvula tipo dámper a través de los diferentes ductos, este realiza la transmisión de frío entre el evaporador y la masa térmica al interior del refrigerador, como alimentos, elementos de salud u otros artículos que no requieren congelamiento.

Algunos laboratorios especializados en tecnologías de refrigeración y termo-física como lo es POLO RESEARCH LABORATORIES®, con el fin de una distribución de flujo de aire para un sistema de refrigeración eficiente, utiliza ensayos tipo túnel de viento con el objetivo de determinar los puntos de operación del conjunto ventilador más refrigerador en la figura 13, se puede identificar el Ensayo del funcionamiento del ventilador al interior del refrigerador doméstico para el cálculo del caudal de aire mediante el uso del túnel de viento. Además desarrollaron estudios que incluyen el dimensionamiento de ventiladores e intercambiadores de calor, la reducción de energía [14], las curvas de caída de presión y el flujo de aire en los intercambiadores, la transferencia de calor y el rendimiento en los tubo y aletas de los evaporadores [15] [16]. Son diseñados bajo la Norma internacional de estandarización AMCA 210:99.

Figura 13. Ensayo del funcionamiento del ventilador al interior del refrigerador doméstico.



Fuente: POLO Research Laboratories® disponible en <http://www.polo.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/laboratorio/bancadas-do-tipo-tunel-de-vento.html> consultado el 01 Abril 2014

1.7 TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento surge con la necesidad de estudiar las propiedades del viento y el comportamiento de diferentes cuerpos al interactuar con él. La finalidad de un túnel de viento es poner a prueba un flujo controlado con el fin de realizar una búsqueda de los modelos teóricos y los conceptos empíricos para analizar la influencia del movimiento del fluido en la dinámica de sólidos o fluidos inmersos o que lo contengan. Parte de la caracterización del túnel de viento consiste en averiguar el lugar de origen de las pérdidas de presión y de potencia para entender en que se gasta la energía en el momento de mover aire y relacionar estas pérdidas de energía con el movimiento de aire que se genera en otros sistemas como pueden ser de refrigeración, calefacción entre otros [14].

Una vez construido el túnel de viento, el primer paso a realizar consiste en evaluar las características de flujo de aire con el fin de lograr simular las condiciones reales de funcionamiento para el cual fue diseñado. La literatura presenta muchos estudios de túneles de viento, algunos de los cuales son el túnel en Gastón Reino Unido, el túnel de viento de circuito cerrado en Londres donde fue desarrollado el método Counihan, identificando la importancia del flujo de aire en la atmosfera [15].

1.7.1 Clasificación de los túneles de viento.

Los túneles de viento se pueden clasificar de acuerdo a la trayectoria de flujo, a la velocidad, al recorrido del aire y a la sección de prueba. También hay otros tipos de túneles de viento como son los túneles de baja velocidad, baja turbulencia, túneles para estudiar el efecto de las grandes alturas; pero estos tipos de túneles están restringidos a casos muy específicos. [16]

1.7.1.1 Clasificación de acuerdo a la trayectoria de flujo.

La clasificación del túnel de viento de acuerdo a la trayectoria puede ser horizontal, vertical e inclinado, por lo general los túneles de viento son construidos horizontalmente, debido a que la mayoría de aplicaciones tienen como finalidad enfrentar este tipo de dirección de flujo, pero también pueden ser verticales como en aplicaciones de caída libre.

1.7.1.2 Clasificación de acuerdo a su velocidad.

La clasificación de acuerdo a su velocidad puede ser transónicos, subsónicos, hipersónicos y supersónicos. Los túneles de viento transónicos se caracterizan por tener velocidades internas ligeramente inferiores o superiores a la velocidad sónica ($0.85 < \text{Mach} < 1.4$), los subsónicos alcanzan velocidades en el aire inferiores a la velocidad del sonido en el aire ($\text{Mach} < 1$) y pueden ser de baja ($\text{Mach} < 0.5$) o alta velocidad ($\text{Mach} > 0.5$), los supersónicos ($1.4 < \text{Mach} < 3$) y los hipersónicos ($\text{Mach} > 3$).

1.7.1.3 Clasificación de acuerdo al recorrido del aire.

En esta clasificación los túneles pueden ser de circuito abierto o cerrado, los túneles de circuito abierto toman aire de la atmósfera, lo pasa por el circuito abierto y lo libera a la superficie. En los túneles de circuito cerrado sucede todo lo contrario, el aire siempre está confinado en un sitio definido.

1.7.1.4 Clasificación de acuerdo a la sección de prueba.

En este caso los túneles de viento pueden tener una sección de prueba abierta o cerrada, en la sección de prueba abierta el modelo no está dentro del ducto sino al descubierto y en la sección cerrada la zona de prueba está dentro del ducto.

1.8 APLICACIONES DEL TUNEL DE VIENTO

Los túneles de viento se utilizan como una herramienta clave en diversas aplicaciones de ingeniería, tales como la aerodinámica de construcción (Niemann, 1993, Stathopoulos, 1984, Meroney et al., 1999 y Cermak, 2003), el estudio de la capa límite (Hansen y Sorensen, 1985 y Schatzmann et al., 1995), la simulación de las capas atmosféricas (Cermak y Cochran, 1992 y Ghani et al., 2001), las pruebas a pequeña escala de modelos de vehículos y la posterior validación de predicciones numéricas (Desai, 2003) [17].

También se destacan otras aplicaciones relacionadas con los estudios del viento como lo son la comodidad viento peatonal (Wu y Stathopoulos, 1993 y Richards et al., 2002), los cuales se ven afectados por el flujo natural del aire a través de los edificios; dispersión de los contaminantes (Saathoff et al., 1995, Meroney et al., 1999 y Baker y Hargreaves, 2001) , lluvia impulsada por el viento (Surry et al, 1994;.Inculet de 2001 y Blocken y Carmeliet, 2004)., la energía eólica (Neff y Meroney, 1998), la carga de viento en cubiertas y fachadas (Stathopoulos et al, 2002, Kumar et al., 2003, Chang y Meroney, 2003 y Kopp et al., 2005), los efectos del viento sobre torres y puentes (Macdonald et al., 2002, Gerges y Vickery, 2003 y Carril et al., 2003).

Los túneles de viento realizados de acuerdo a su velocidad suelen ser utilizados en ensayos de turbinas a gas y compresores, en investigaciones dinámicas de vuelos y ambientales, en estudios característicos de motores de aviación. Todo este tipo de aplicaciones se realizaron con el fin de garantizar un medio de análisis rápido, económico y preciso al problema a investigar.

2. NORMATIVA

El propósito de este capítulo, es realizar una recopilación de las normas más importantes para la evaluación y ensayos de los ventiladores, con el fin de orientar el uso correcto de la normativa y establecer una comparación de las ventajas, que ofrece la norma seleccionada frente a los diferentes normas equivalentes en los otros estándares gubernamentales o privados.

2.1 IMPORTANCIA DE LA NORMA.

Las organizaciones gubernamentales y grupos empresariales privados en conjunto, con el fin de asegurar la calidad, eficiencia y dar especificaciones de clase mundial a los productos, crean normas para la estandarización. Más de 165 países son miembros de las mayores normas internacionales. [18]

Algunas de las normas internacionales más reconocidas para ventiladores son establecidas por la Asociación de Control y Movimiento del Aire (**AMCA**) en asocio con la organización internacional de estandarización (**ISO**), **quienes buscan** reducir el uso de la energía en los ventiladores y al uso óptimo de este. De igual forma, industrias de países como Japón o el Reino unido estandarizan sus productos con el fin de comercializar y seleccionar los ventiladores más adecuados de la amplia gama que fabrica.

La norma implementada por la **ASHRAE** (*the American society or heating, refrigerating, and air conditioning*) para establecer métodos de ensayos en ventiladores u otros dispositivos de movimiento de aire es la normativa: ANSI/ASHRAE 51-07, tiene como alcance determinar el rendimiento aerodinámico en términos del caudal, presión, potencia consumida, densidad de aire, velocidad de rotación. Sin embargo existen otras organizaciones que establecen normas con los mismos propósitos y se consideran equivalentes, estas son nombradas en la tabla 3.

Tabla 3. Normas equivalentes ANSI/ASHRAE 51-07.

Norma	País de origen	Título	Vigencia
ISO 5801: 2007	Internacional	<i>Industrial Fans- Performance Testing Using Standardized Airways</i>	Vigente
ANSI/AMCA 210-07	Internacional-USA	<i>Laboratory Methods of Testing fans for certified Aerodynamic Performance Rating</i>	vigente
JIS B 8330:2000	Japonesa	<i>Testing Methods for Turbo-Fans</i>	reafirmada
BS 848-1: 1997	Británica	<i>Fans for general purposes. Performance testing using standardized airways.</i>	Remplazada por la BS en ISO 5801:2008
NF EN ISO 5801: 2009	Francesa	<i>Ventilateurs industriels- essais aérauliques sur circuits normalisés</i>	vigente
DIN 24163-2:1985	Alemana	<i>Fans; performance testing, standardized test airways</i>	Remplazado por la DIN en ISO 5801: 2010-12

2.2 NORMATIVA INTERNACIONAL ISO 5801:2007

Esta es la versión más reciente de la norma, reemplaza la primera edición (ISO 5801: 1997) y se preparó por el comité técnico ISO/TC 117, la industria de ventiladores y en estrecha relación con la IEC (comisión internacional de electricidad). Después de 30 años de investigación, discusión, ensayos comparativos y análisis de detalle establece el estándar para el ensayo aerodinámico de ventiladores con un trabajo por unidad de masa inferior que 25kJ/kg, donde se tiene en cuenta las siguientes características [19]:

Se dividen por categoría de instalación, dado que las conexiones de un ducto de salida o entrada en el ventilador modifican su rendimiento, se acordó de cuatro categorías de instalación estándar las que deben ser consideradas. Un ventilador puede ser adaptable a más de una categoría de instalación, por consiguiente deberá tener un rendimiento característico estandarizado, donde el usuario seleccionara la categoría más cercana de su aplicación.

Para estandarizar la trayectoria del aire, se realizará a través de una geometría de un ducto especial conocida como “partes en común”. Las diferencias obtenidas en las Partes en común al probar el mismo ventilador de acuerdo con varios tipos de ensayos depende principalmente del patrón de flujo en la salida del ventilador y si bien a menudo de menor importancia hay un acuerdo general para todas las

pruebas estandarizadas se utilicen partes en común adyacentes a la entrada o salida del ventilador para asegurar la presión sea constante.

La presión del ventilador es definida como la diferencia entre la presión de estancamiento o total a la salida y la presión total en la entrada del ventilador. La compresibilidad del aire puede ser tomada en cuenta cuando la precisión lo requiera, sin embargo métodos simplificados pueden ser usados cuando la referencia del Número de mach (Ma) no exceda el 0,15.

El cálculo del caudal a través del ventilador descrito en esta norma es similar a norma **AMCA** para la medición con **Nozzles**, sin tener en cuenta la determinación del flujo por medio del tubo pitot, el cual es susceptible errores por lectura, por esta razón es separada totalmente de la determinación de la presión del ventilador. Para el cálculo de la potencia y la eficiencia del ventilador en esta norma proponen 3 métodos diferentes los cuales difieren entre sí para relaciones de presión igual a 1:3.

2.3 NORMATIVA JAPONESA JIS B 8330:2000

Esta norma de la sociedad japonesa de maquinaria industrial y manufactura especifica el ensayo y los métodos de inspección para ventiladores axiales, centrífugos y de flujo mixto. De una relación de presión aproximadamente inferior a 1.3, en trabajo usando aire de habitaciones con temperaturas normales, cuando esta relación sea superior a este valor se aplicara la norma JIS B 8340 o bajo condiciones especiales.

Este modelo fue establecida con base a la primera edición de la ISO 5801:1997 *industrial fans-performance testing using standardized airways*. Equivale a la correspondiente norma internacional en su versión actual (2014 reafirmada por JIS) [20]

2.4 NORMATIVA REFERENTE ASHRAE 51-07/AMCA 210-07

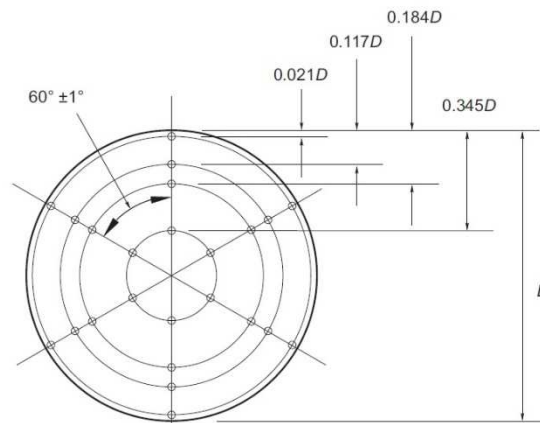
Esta es la onceava revisión y abarca la terminación de más de 8 años de mejoras estableciendo métodos de ensayos para ventiladores con un presión hasta de 30kPa con aceptación en la práctica industrial, excluyendo el uso de ventiladores de techo, ventiladores de presión positiva, compresores con inter-etapas de enfriamiento, máquinas de desplazamiento positivo. Esta norma establece principalmente dieciséis configuraciones diferentes con cuatro tipos conexiones generales para el ensayo de ventiladores, sin embargo se puede dividir en dos métodos de medición, los cuales son basados en el flujo o la presión. [21]:

La prueba que mide el desempeño del ventilador a partir de la presión dinámica y la presión estática se denomina Método de medición de flujo, en la figura 14 se ve un esquema para el montaje de las mediciones. Su gran ventaja es el bajo costo,

sin embargo requiere de una gran cantidad de mediciones, las cuales pueden generar, algunas variaciones en la incertidumbre de la presión registrada por el uso del tubo pitot; este método de medición aplica para las configuraciones 7A, 7B, 13, y 16 de la norma. Además para garantizar que el flujo de aire sea lo más laminar posible, se puede seleccionar cualquier tipo de sedimentador de flujo, por recomendación de la norma se sugieren rectificadores de flujo A (tipo celda) y B (tipo estrella).

El cálculo del caudal es obtenido a partir de la medición de la presión de velocidad, obtenido por el uso del tubo pitot, siempre que la velocidad de la prueba se inferior a 12 m/s, (AMCA 210-07, sección 4.3.1, 2007).

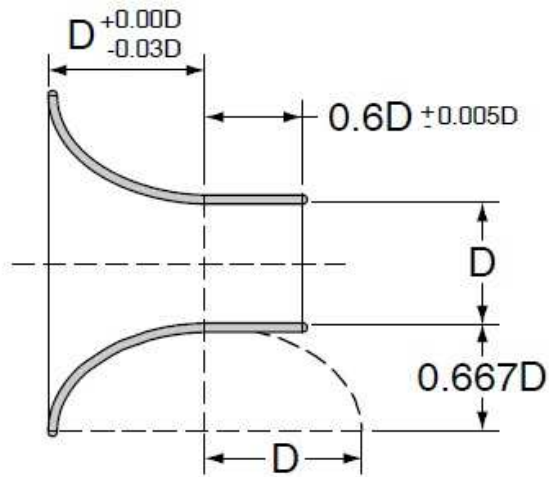
Figura 14. Medición de la presión de velocidad y estática con el Tubo pitot.



Fuente: *Total pressure tube, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating*, ASHRAE, 2007, Pág. 23

El segundo método que propone la norma se basa en la medición de la presión diferencial a través de una o varias boquillas (**Nozzles**). Esta es un poco más costosa que el método anterior, por el uso de boquillas normalizadas como se observa en la figura 15, pero su mayor bondad es la repetitividad y mayor precisión, este tipo de medición aplica para las siguientes configuraciones de la norma : 8A, 8B, 9A, 9B, 9C, 10A, 10B, 10C, 11, 12, 14,15. El subíndice establece el tipo de sedimentador de flujo utilizado A (tipo celda), B (tipo estrella) y C (parte en común).

Figura 15. Medición de la presión diferencial con Nozzles.



Fuente: *Nozzle for flow measurement chambers, HVI Airflow test procedure, Home Ventilating Institute, USA, 2009, Pág. 23.*

La utilización de boquillas o nozzles de diferentes diámetros internos, permitirá obtener distintas mediciones de presión estática y presión diferencial. De este modo se puede obtener cualquier punto de operación desde la descarga libre (*free delivery*) hasta el punto de máxima presión estática (*shut-off*). Los diámetros disponibles de las boquillas para este banco de ensayos se muestran a continuación:

Tabla 4. Boquillas De Medición disponibles

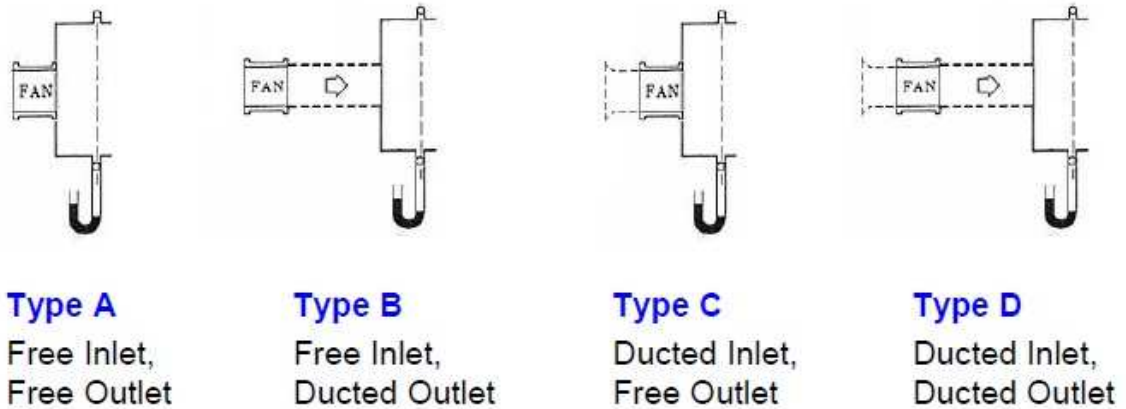
Air Flow Nozzle size				
Bore diameter [in]	Diameter [mm]	Approximate flange diameter [in]	Approximate clearance hole [in]	Blank material thickness Al [in]
0,375	9,53	2,188	1,000	0,063
0,500	12,70	3,000	1,167	0,063
0,687	17,45	4,000	1,603	0,090
1,000	25,40	3,750	2,334	0,125
1,250	31,75	5,500	2,918	0,125
1,600	40,64	5,250	3,734	0,125
2,000	50,80	7,500	4,668	0,125
3,000	76,20	9,875	7,002	0,125

Fuente: Standard Air Flow Nozzles Products, Hollander Metal Spinning Company <http://www.hellandermetal.com/standard-air-flow-nozzle-products.html>, consultado el 05 de Julio 2014.

Las boquillas de medición requeridas por esta norma se consideran, como un instrumento primario y no requieren de calibración, si estos se mantienen en condiciones adecuadas.

Cada método descrito anteriormente, puede utilizar, una de las cuatro disposiciones o tipos de instalaciones que existen, dependiendo de la aplicación del ventilador de prueba, en el cual se puede incluir o especificar el uso combinado de esta. Se define cada instalación de la siguiente forma: tipo A (libre admisión-libre descarga), tipo B (libre admisión-ducto de descarga), tipo C (ducto de admisión-libre descarga), tipo D (ducto de admisión-ducto de descarga). En la figura 16 se observa su funcionamiento [22].

Figura 16. Tipo de instalaciones de acuerdo a la aplicación del ventilador.



Fuente: *Installation Type, Amca 210 Series Wind Tunnel Introduction, Long Wing Science & Technology, Taiwan, 2014, Pág. 14.*

De igual manera la norma recomienda una tabla para la selección adecuada de la configuración del tipo de banco de ensayos, de acuerdo a las siguientes características: no aptos para ventiladores con turbulencia significativa (NS) y adecuado para todo tipo de ventilador (Y).

Tabla 5. Guía de Selección Norma ANSI/ASHRAE 51-07.

Configuración	Tipo de instalación			
	A	B	C	D
7A, 7B, 8A, 8B, 9A, 9B, 9C, 10A, 10B, 10C		NS		NS(a)
11, 12, 13, 14 y 15	Y(b)	Y(c)	Y(a,d)	Y(a,c)
16			Y	Y(c)

Fuente: *Selection guide, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI/ASHRAE 51-07, ASHRAE, 2007, Pág. 9*

El subíndice en paréntesis especifica: (a) un ducto de admisión simulado puede ser usado, (b) una campana de admisión auxiliar o un ducto de descarga no puede utilizarse, (c) un ducto de descarga o conducto de descarga corto puede usarse, (d) no se puede usar un conducto de salida.

El reporte de la prueba incluye descripciones del ensayo, en donde se indica el estado de admisión y descarga en las fronteras del ventilador, en un gráfico del caudal de aire como la abscisa y la presión estática, la presión total, la potencia o porcentaje de rendimiento como ordenada, y especificar si los resultados fueron obtenidos a una densidad o si fueron convertidos a una densidad nominal del aire.

3. DISEÑO DEL TUNEL DE VIENTO BAJO LA NORMA ANSI/ AMCA 210-07.

En este capítulo se toma a la norma internacional ANSI/AMCA 210-07 como guía para el diseño del túnel de viento, identificando los requerimientos principales de la normativa, la cual considera como restricción principal de diseño, el diámetro del ventilador de prueba, además se indica los instrumentos primarios utilizados con el flujo de aire, como lo son los sedimentadores de flujo y tomas de presión, por último se presentan las secciones principales del túnel de viento.

3.1 Justificación y Dimensionamiento.

El banco de ensayos tipo túnel de viento se diseña principalmente para ofrecer factores de evaluación para los moto ventiladores del evaporador en los refrigeradores domésticos del mercado nacional, teniendo en cuenta la idoneidad funcional de varios de estos tipos de ventiladores con respecto a su aplicación y aprovechando la versatilidad, calidad y el rendimiento que ofrecería cada uno de ellos, seleccionar el más adecuado.

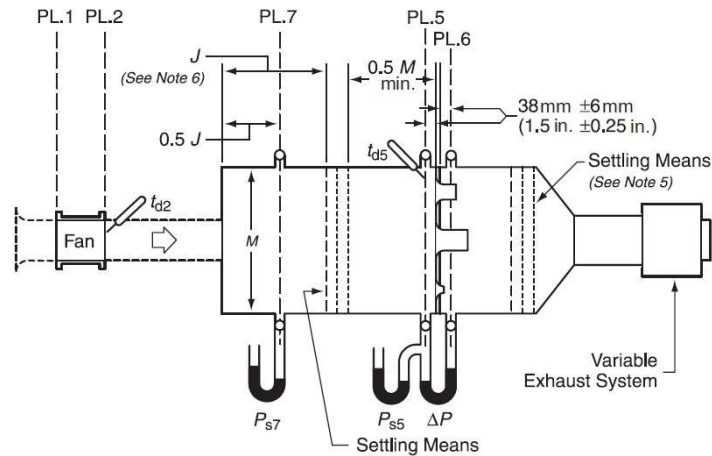
El espacio previsto para ubicar este banco de ensayos es el centro de investigación, desarrollo y calidad en refrigeración y climatización (CIRCLI) de la Universidad Pontificia Bolivariana. Por tanto debe ser lo más reducido que se pueda, para no interferir con los demás espacios habilitados para otros proyectos, además debe ser desmontable para poder trasladarlo a diferentes sitios.

Las dimensiones del túnel de viento son establecidas a partir de la Norma ANSI/AMCA 210-07 donde se indica que tipo de configuración es más adecuada de acuerdo a la naturaleza del ventilador y a su funcionamiento, para conocer su curva característica y la resistencia que ofrece el refrigerador frente al caudal entregado por el mismo. Se especifica el tipo de instalación A (***free Inlet-free Outlet***) y D (***Ducted Inlet, Ducted Outlet***) como las más aproximadas a las condiciones de trabajo del ventilador. Para garantizar repetitividad y precisión se elige el método de medición de presiones a partir de boquillas descrita en la sección 2.4 de este documento como el procedimiento para la obtención de datos. Con la ayuda de la tabla 5 se seleccionó la configuración número 12 y 15 como guía en las distribuciones del túnel de viento.

A partir de las configuraciones elegidas, se puede observar una misma cámara de medición de flujo de aire pero en las cuales cambian el sentido de flujo. En la configuración 12 de descarga (Figura 17) y en la configuración 15 de admisión (Figura 18), que refiere a la posición del ventilador. De esta forma se construyó un túnel con ambas especificaciones, permitiendo con sencillos pasos cambiar el tipo de configuración del mini túnel de viento.

Seleccionamos el polimetilmetacrilato conocido como PMMA o acrílico por su versatilidad de procesamiento, resistencia a la intemperie, aislamiento térmico y acústico, baja densidad ($1,19 \text{ g/cm}^3$), además de permitir translucidez. Cualidades requeridas para el banco de ensayos.

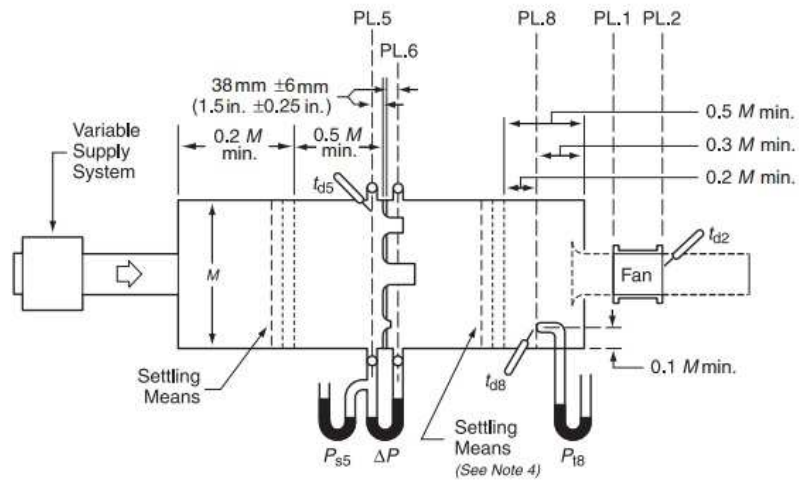
Figura 17. Cámara de descarga, Configuración 12



Fuente: *Figure 12 – outlet chamber setup- Multiples nozzles in chamber, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI/ASHRAE 51-07, ASHRAE, 2007, Pág. 38.*

Este banco de ensayo se compone de ductos, cámaras de medición, sedimentadores de flujo, aros piezométrico, grifos para la toma de presión, indicadores de presión, indicadores de temperatura boquillas de medición y de un ventilador auxiliar. En las figuras 17 y 18 se indica la distribución de estos al interior del túnel de viento.

Figura 18. Cámara de admisión, Configuración 15.



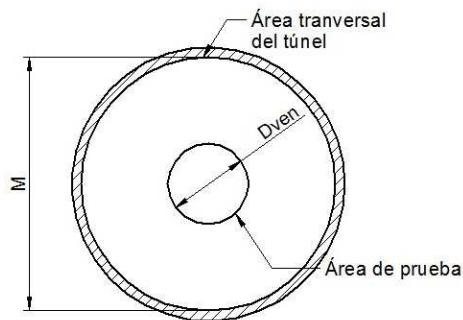
Fuente: *Figure 15 – inlet chamber setup- Multiples nozzles in chamber, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI/ASHRAE 51-07, ASHRAE, 2007, Pág. 41.*

Se utilizara una sección circular para el mini túnel de viento debido a la facilidad que representa esta geometría en su fabricación. Además es congruente con la geometría circular de descarga de los ventiladores axiales permitiendo un desarrollo adecuado del flujo.

3.1.1 Área de sección transversal del túnel de viento

El túnel de viento se compone de cámaras de medición donde existe un espacio confinado dispuesto para el desarrollo del flujo de aire, estas cámaras son de admisión y de descarga, tienen un área de admisión que debe tener una sección transversal de al menos cinco veces al área del plano de salida del ventilador de prueba, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Cámara túnel de viento.



Donde M equivale al diámetro interior del túnel de viento y D_{vent} equivale al diámetro del ventilador de prueba. En la tabla 2 se muestra el rango de diámetros disponible para esta clase de ventiladores, véase el numeral 1.4.

$$A_{túnel} = 5A_{prueba}$$

$$\frac{\pi}{4} * D_{túnel}^2 = 5\left(\frac{\pi}{4} * D_{ventilador\ de\ prueba}^2\right)$$

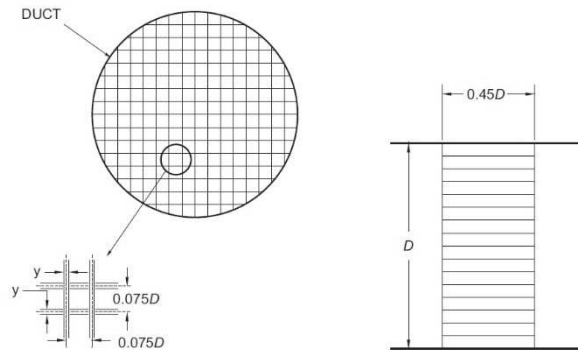
$$M = \sqrt{5}D_{vent} \rightarrow \sqrt{5} * (114) * FSD = 298,24\ mm\ Eq.1$$

Se selecciona el diámetro más grande del ventilador de prueba disponible 114 mm, multiplicado por un factor de sobre dimensionamiento (FSD), de 1,17 para el cálculo del diámetro del túnel de viento y aproximándolo a 300mm. Este debe tener un redondez dentro del 0.5% del diámetro

3.2 SEDIMENTADORES DE FLUJO.

El propósito de los sedimentadores o enderezadores de flujo instalados en las cámaras de medición varía de acuerdo a la posición. Cuando estos se ubican aguas arriba de un plano de medición el propósito de este es proporcionar principalmente un flujo uniforme, en cambio si este se ubica aguas abajo, la función del sedimentador de flujo es absorber la energía cinética o la velocidad debido al impulso generado por el ventilador. Usualmente se requiere de más de un sedimentador de flujo para establecer condiciones óptimas para la medición denominado espacio confinado. Ya que este es lugar determinado por un volumen de aire adecuado para la toma de datos.

Figura 20. Sedimentador de flujo.



Fuente: *Flow Straightener- Cell Type, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI/ASHRAE 51-07*, ASHRAE, 2007, Pág. 26.

Los enderezadores de flujo, pueden variar de acuerdo a su forma geométrica. Se elige un sedimentador de flujo tipo celda, el cual consta de tres secciones donde se varía el porcentaje de apertura decreciendo en dirección del flujo. La primera malla tiene un apertura del 60%, la segunda malla del 50%, la tercera malla del 40%, ambas mallas se encuentran separadas entre sí por 70 mm, sugerido por la norma referente para esta clase de sedimentadores. Además estas mallas se encuentran sujetas a un anillo de ensamble de calibre 16 en acero inoxidable, con ocho perforaciones y unidas por espárragos y tonillos ajustables, garantizando la separación mencionada como se muestra en la foto 1.

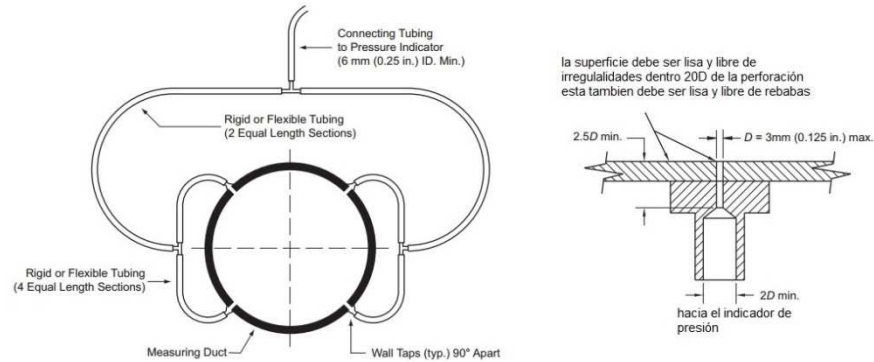
Foto 1. Distancia mínima entre mallas del Enderezador de flujo.



3.3 ARO PIEZOMÉTRICO Y TOMAS DE PRESIÓN.

Para la adquisición de datos de presión, es sugerido por la norma el uso de grifos de medición, las cuales se posicionan en perforaciones de un diámetro máximo de 3mm en el cuerpo del túnel, libres de irregularidades y rebabas como se muestra en la figura 21. En ductos redondos es recomendado que se implementen aros piezométrico localizados a 45 grados de la horizontal, unidos entre sí por manguera rígidas o flexibles. En este caso se utilizó tuberías de Nylon con una temperatura de trabajo de -40°C a 125°C y una presión de trabajo de 8MPa, conectadas a sensores de presión estática y diferencial de presión marca LP 1000 SERIES GE DRUCK.

Figura 21. Aro piezométrico (Izquierda) y Grifos presión estática (Derecha).



Fuente: *Flow Straightener- Cell Type, Laboratory Methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating: ANSI/ASHRAE 51-07, ASHRAE, 2007, Pág. 22*

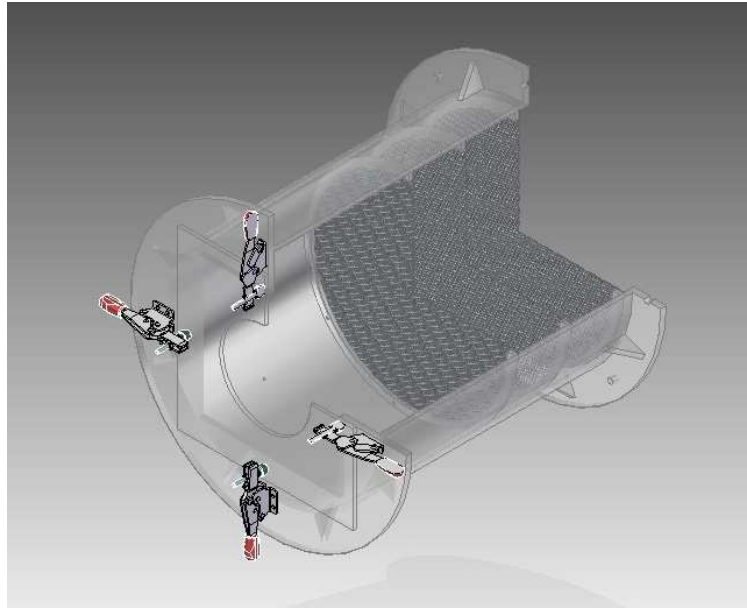
3.4 SECCIONES DEL TÚNEL DE VIENTO

El banco de ensayos se ha diseñado con una estructura modular, de tal forma que permita el acceso a los diferentes elementos de medición. Por consiguiente se encuentra dividido en 4 secciones de acuerdo a su funcionalidad dentro del túnel de viento.

La primera sección se denominará cámara de admisión/descarga esta tiene como objetivo establecer un plano de medición de la presión estática. Cuenta con un aro piezométrico, un enderezador de flujo, y una serie de grapas rápidas que sirven como elemento de sujeción para el soporte del ventilador de prueba. Para evitar que haya un exceso en el aire de retorno se limita el área de entrada únicamente al área del ventilador de prueba.

La longitud total de esta sección es de 0,37 m. El plano de medición de presión estática (PL.7 configuración 12 y PL.8 configuración 15) se encuentra ubicado a 100 mm del plano de descarga del ventilador de prueba, el enderezador de flujo se encuentra ubicado a 210mm (Dimensión J de la configuración 12) desde la admisión satisfaciendo los requerimientos mínimos exigido, en la figura 22 se muestra la modelación realizada para esta sección.

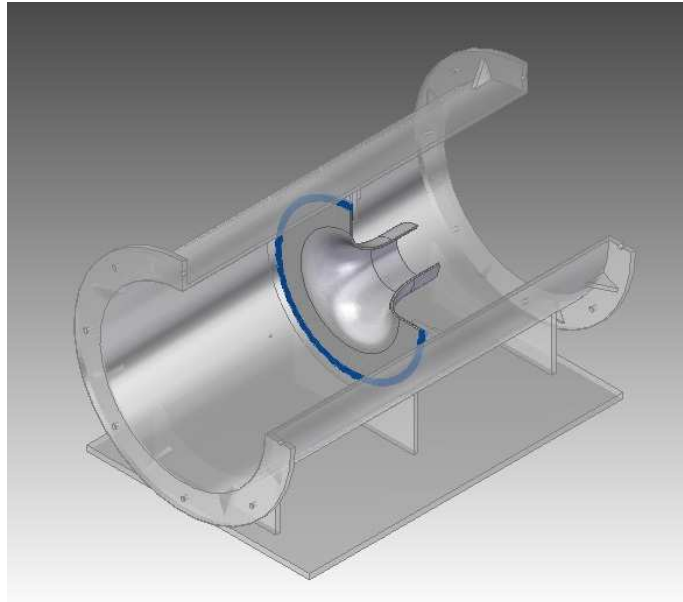
Figura 22. Cámara de Admisión/Descarga.



La segunda sección nombrada Cámara de prueba (ver Figura 23) es la más importante debido que esta proporcionará la estación de medición del caudal a partir de las boquillas de medición. Tiene un soporte macho en donde se pueden insertar las boquillas de medición sujetas a una base hembra ajustadas por medio de un aro de posicionamiento. Esta sección cuenta además con el plano de medición cinco (PL.5) aguas arriba de la boquilla de medición y el plano seis (PL.6) aguas debajo de la boquilla de medición, con sus respectivos aros piezométrico conectados al sensor de presión, en donde se puede medir presión estática (P_{s5}) y diferencial de presión (ΔP).

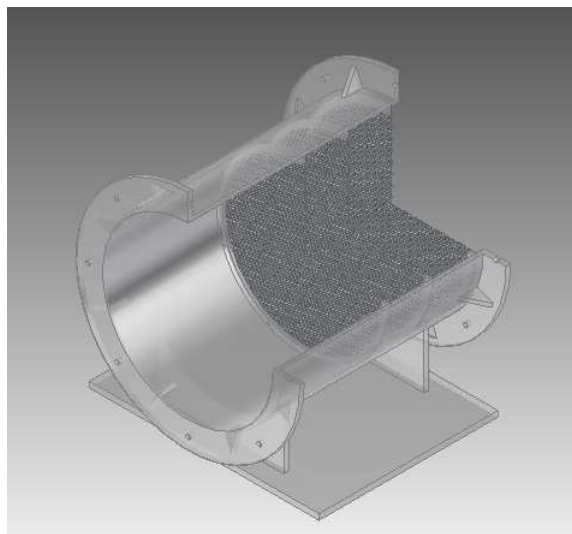
Se optó por hacer esta sección simétrica con centro en el soporte de las boquillas, de este modo se puede invertir la sección de acuerdo a la configuración requerida, además cumple con la distancia mínima requerida desde la salida de la boquilla aguas debajo de 2.5 veces el diámetro de la boquilla más grande. Debido que se requiere un espacio mínimo 1,5 diámetros desde la pared del túnel al centro de la boquilla y 3 diámetros entre ellas, se dispuso de una boquilla a la vez. Tiene una longitud total de 624 milímetros.

Figura 23. Cámara de pruebas.



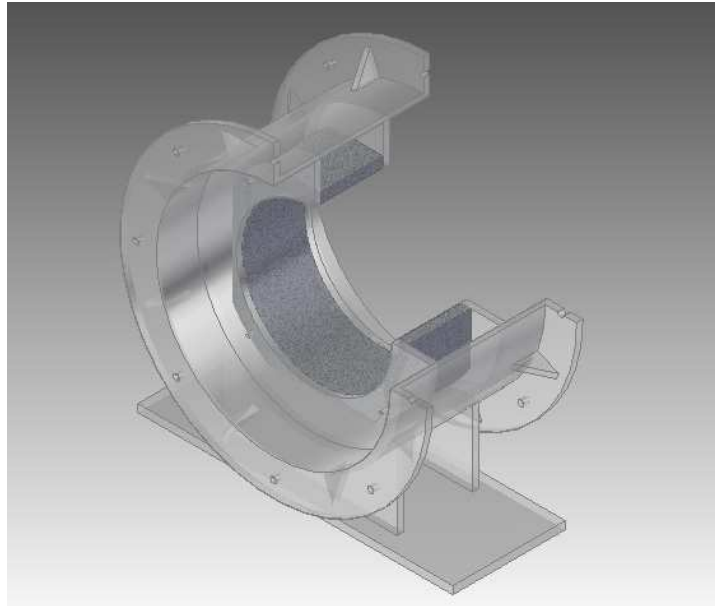
La tercera sección denominada zona de descarga se presenta en la Figura 24 y tiene como función permitir el desarrollo del fluido aguas debajo de las boquillas de medición y posee un enderezador de flujo para el caudal proporcionado por el ventilador auxiliar. Esta zona es la más dispuesta a la acumulación de suciedad y polvo debido a que el enderezador de flujo actuaría como un tamiz ante las partículas dispuestas en el aire, por esto requiere de una extracción fácil para tareas de limpieza y mantenimiento del mismo. Con una longitud de 370 mm.

Figura 24. Zona de Descarga.



La cuarta sección (ver Figura 25) contiene al ventilador auxiliar, por consiguiente en su interior dispone de dos bandejas circulares conectadas por tornillos que sirve como soporte y sujeción del ventilador, además establece el área de admisión y descarga del mismo, tiene instalado un conducto para la ingreso de cables de alimentación y control. Esta sección se encuentra abierta al ambiente y por ello es susceptible al ingreso de polvo y suciedad que puede afectar el uso óptimo del ventilador auxiliar. Tiene una longitud de 200mm.

Figura 25. Soporte Ventilador Auxiliar.

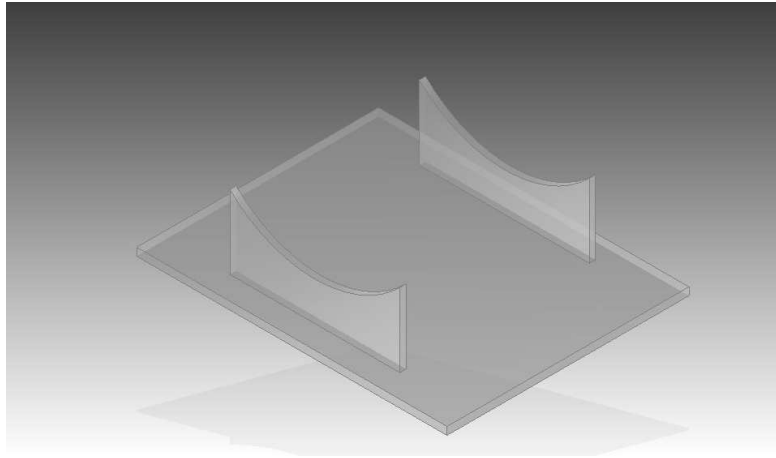


El plano de salida del ventilador auxiliar debe tener una distancia mínima con el enderezador de flujo aguas arriba de mínimo 0.2 veces el diámetro del túnel de viento (E.F), de tal modo que no exista una alta caída de presión.

3.5 BASE DE APOYO BANCO DE ENSAYOS.

El túnel de viento se encuentra soportado sobre una base de apoyo, la cual es de acrílico de 8mm de espesor, y está conformado por un rectángulo base unido axialmente con un rectángulo con una media luna en la parte superior que da soporte como se muestra en la figura 22. Permitirá que el perímetro del túnel de viento descansa sobre geometría de apoyo, además distribuirá el peso total del túnel en diferentes puntos, estableciendo tres apoyos para la cámara de pruebas y dos apoyos para las demás secciones, para un total de nueve puntos de carga.

Figura 26. Base apoyo túnel de viento.



3.6 SOPORTE VENTILADOR DE PRUEBA.

Para garantizar que los ventiladores de prueba se conecten concéntricamente y se encuentre a la misma distancia del plano de entrada del túnel de viento, se diseñó un soporte del ventilador. Este consta de una sección hembra conectado al ventilador, por tres tornillos de sujeción y con dos amortiguaciones de caucho para la carcasa del motor del ventilador como se muestra en la foto 6.

Foto 2. Hembra Soporte Ventilador Prueba.



Adema cuenta con un macho para el ensamble con el túnel de viento mediante grapas rápidas de sujeción hecho en acrílico de 5mm de espesor y con perforaciones para la unión con la hembra del soporte, como se muestra en la foto 3. Esta macho se fabrica con un diámetro de perforación 3mm más grande que el diámetro de la aspa del ventilador de prueba.

Foto 3. Macho Soporte Ventilador prueba.



3.7 ESTRUCTURA SOPORTE TÚNEL DE VIENTO.

La estructura tiene como función soportar el túnel de viento y dispone de espacios para la instalación de gabinetes de control, equipos eléctricos y de medición. Lo conforman tres niveles, el primer y segundo nivel tiene bandejas de madera para instalación de equipos y descanso de herramientas, en el tercer nivel se encuentra sujetos los apoyos del túnel de viento los cuales como se mencionó en la sección anterior distribuirán el peso a lo largo de la estructura, en el lateral derecho se dispone de travesaños para la instalación del gabinete de control.

Se utilizó un perfil de aluminio tipo 5 para la fabricación del armazón sujetos con tornillos cabeza Allen M6x1x20, Sus dimensiones son de 1085x1564x403 milímetros de alto, por ancho, por profundo respectivamente.

Figura 27. Estructura Soporte Túnel de viento.



El gabinete de control y los equipos eléctricos que este tiene en su interior, estuvieron a cargo del grupo de automática y diseño (A+D) de la Universidad Pontificia Bolivariana, su diseño y fabricación, ensamble eléctrico no es competencia de este trabajo de grado.

A continuación en tabla 6 se detalla un resumen de la información expuesta anteriormente, donde se define las medidas principales del túnel de viento. Se establecieron como medidas críticas las mínimas requeridas por la norma y a partir de esta, se sobre dimensiona con el fin de proporcionar el mayor cumplimiento de las medidas sugeridas por las figuras 17 y 18 de este capítulo, además recopila la información de acuerdo al parámetro principal requerimiento para cada tipo de configuración.

Tabla 6. Resumen distancias mínimas sugeridas por la norma.

Parámetro		Figura 12		Figura 13		Túnel de viento		
Sección	Descripción	Requisito	Valor min. [mm]	Requisito	Valor min. [mm]	Longitud [mm]	Cumple	Fig .
Cámara Admisión/ Descarga	Distancia E.F	J=0,35M nota 6 E.F	105	0.5M	150	210	SI	22
	Plano de medición	PL. 7 Distancia min.0.5J	52,5	PL. 8 Distancia min. 0.3M	90	100	SI	22
Cámara de Medición	Distancia PL.5 y E.F	0.5M min.	150	0.5M min.	150	265	SI	23
Zona de descarga	Distancia entre Vaux. y el E.F	N.A	N.A	0,2M min con el E.F	60	60	SI	24

Nota:

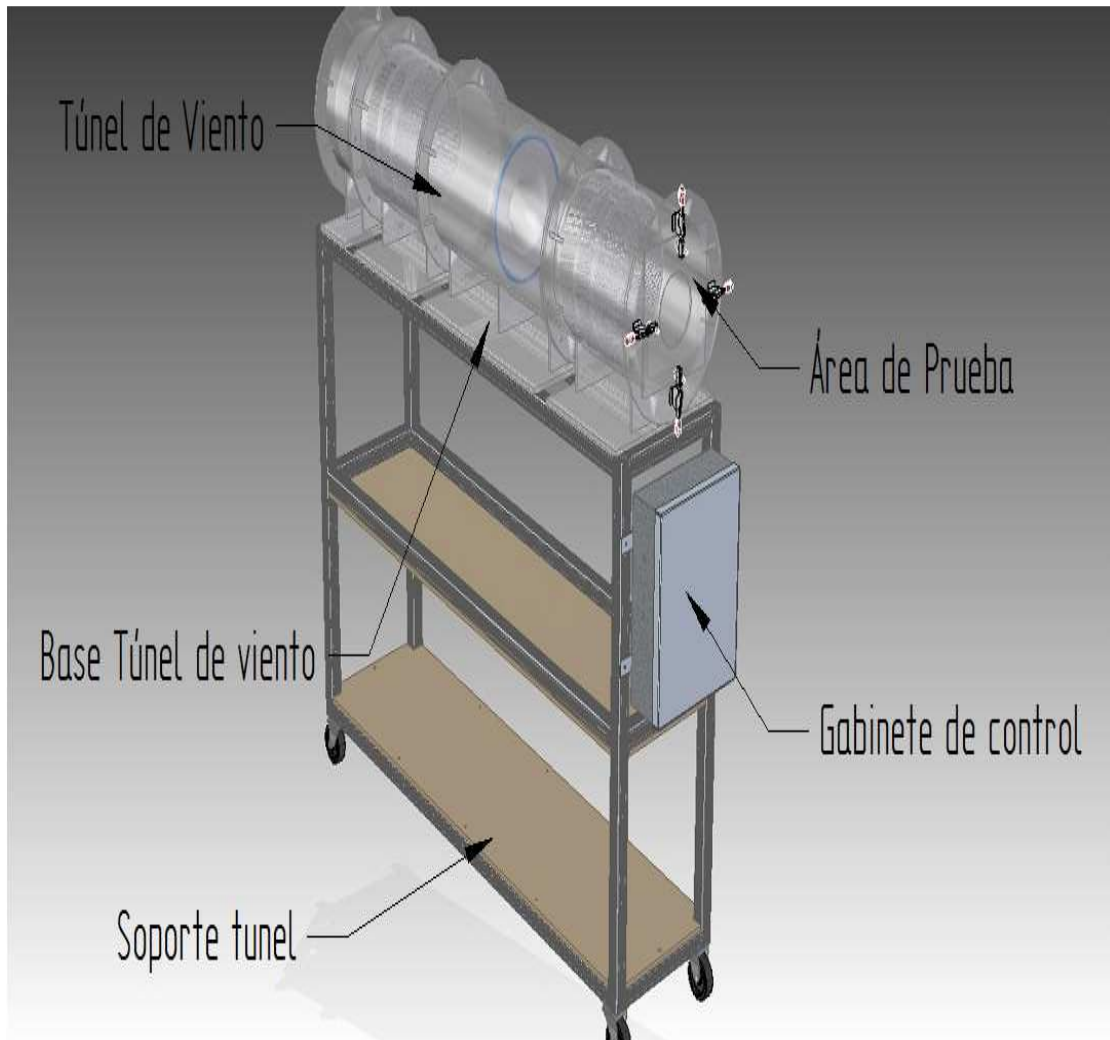
E.F: Enderezador de flujo.

Vaux.: Ventilador auxiliar.

P.L: Plano de medición

N.A: No aplica

Figura 28. Componentes mini Túnel de viento.



4. CONSTRUCCIÓN Y CALCULOS.

El objetivo de este capítulo es presentar la construcción del túnel de viento, dando a conocer la evidencia del cumplimiento de los requerimientos sugeridos por la normativa, además de una introducción a los instrumentos de medición. Finalmente se realiza un énfasis especial en los datos adquiridos con el túnel de viento y el modelo de cálculo de las variable de interés como: densidad del aire, caudal, Presión estática en el ventilador entre otras.

4.1 CONSTRUCCIÓN.

Verificadas las dimensiones mínimas, se procede a construir el túnel de viento, iniciando con la fabricación de la estructura soporte del túnel, se cortaron los perfiles tipo 5 de aluminio en la sierra sinfín, según la cantidad requerida en la tabla 7. Debido al corte irregular de la maquina se pulieron las superficies del perfil en el torno, luego se procedió a realizar el roscado en la perforación del perfil, finalmente se hicieron perforaciones para el ensamble de los perfiles con los tornillos de sujeción. Los peldaños son de láminas de aluminio de 5mm de espesor por 40mm de ancho

Tabla 7. Componentes de la estructura soporte del Túnel de viento.

Componente de la estructura	Cantidad	Longitud [mm]
Verticales	4	1020
Largueros	6	327
Horizontales	8	1488
Travesaños	2	725
Peldaños	2	400

Para el ensamble de las estructuras se utilizó nivel, tornillos de sujeción, perfiles tipo 5 y mazo de goma, iniciando por la unión de los perfiles verticales y

horizontales formando el marco frontal y posterior sujetos con tornillos. Luego estos se unen con los largueros de acuerdo al nivel, iniciando desde el nivel 1, luego nivel 2 y terminando con el nivel 3. Se aprietan los tornillos y se ajusta con el mazo de goma. Finalmente se ensambla las rodachinas sencillas en el marco frontal y las rodachinas con freno en el marco posterior.

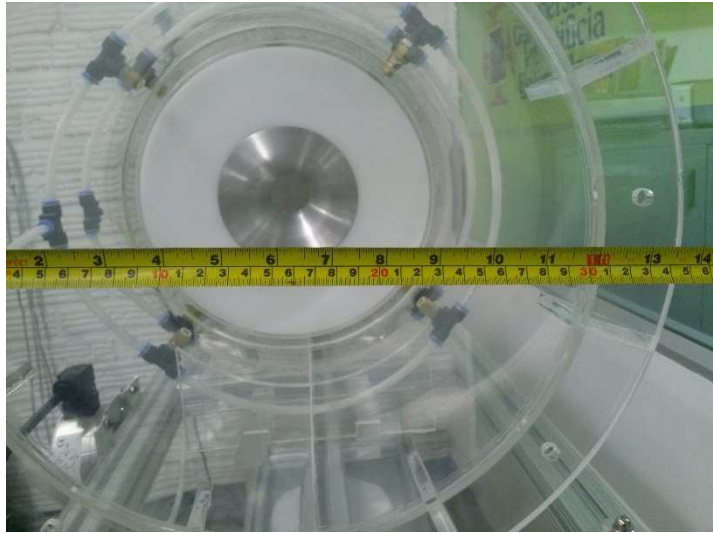
Foto 4. Estructura soporte, Segundo nivel, ubicación de los Nozzles.



Las bandejas de los niveles 1 y 2 son de madera triplex de 1564mm de largo por 400 mm de ancho, pulidas con lija 380, selladas con imprimador marca ALGRECO para no permitir humedad y facilitar la adhesión de la pintura en aerosol color gris plata.

Para la fabricación de las bases soportes y las secciones del túnel de viento se concertó con la empresa Acrílicos Serna la realización del procesado de las piezas bajo planos. La secciones del túnel requieren de rolado, corte, perforado para establecer la geometría circular con un diámetro de 300mm mostrado como evidencia en la foto 5.

Foto 5. Sección circular del Túnel de viento, diámetro interior.



Para la cámara de Admisión/Descarga, además del proceso anterior, requiere de perforaciones en el exterior de la sección para la instalación de los aros piezométrico, y la instalación del enderezador de flujo a una distancia mínima de 210 mm, mediante el deslizamiento del mismo, sujetos por tuercas.

Foto 6. Distancia entre el área de admisión y el enderezador de flujo.



Finalmente se instala con tornillos cabeza Allen las grapas rápidas, 2 verticales y dos horizontales, además se instalan las boquillas para la toma de presión.

Foto 7. Cámara de Admisión.



La Cámara de pruebas lleva instalado las boquillas de medición a 94mm de distancia entre ellas, permitiendo la toma de presión aguas arriba y abajo de la boquilla de medición, con su respectivos aro piezométrico.

Foto 8. Distancia entre planos de medición de presión diferencial.



Por último en la instalación del soporte de la boquilla de medición, se asegura que las diferentes boquillas se puedan posicionar a la misma distancia y los diferentes nozzles de pruebas puedan ubicarse lo más concéntricos al túnel de viento. Para la ubicación de la boquilla de medición se desliza en dirección de la flecha como se muestra en la foto 9.

Foto 9. Cámara de Prueba, ubicación Boquilla de medición.



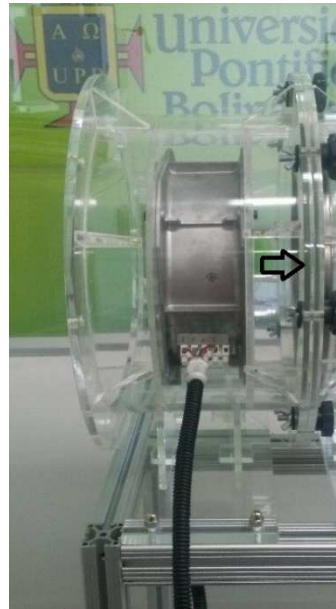
Para la ubicación del enderezador de flujo aguas abajo de la boquilla de medición, se verifica el número de la malla la cual esta del rango de 1 a 3, siendo el número 1 de mayor apertura y número 3 con menor apertura como se muestra en la foto 10. Se desplaza en dirección de la flecha hasta el tope y se sujeta con tuercas.

Foto 10. Ubicación enderezador de flujo zona de descarga.



Para la instalación del ventilador auxiliar se cablea el sistema de control y se desplaza hasta el sitio predispuesto para ello de modo que el flujo de aire sea el que se indique en la dirección de flecha mostrada en la foto 11, finalmente se asegura con tonillos cabeza Allen.

Foto 11. Instalación ventilador Auxiliar.



En los extremos de cada sección se utiliza uniones tipo brida, sujetadas con perillas de ajuste para garantizar, que todas las secciones estén concéntricas y exista una hermeticidad, de modo que se tenga la menor cantidad de pérdidas o fugas de aire entre las juntas, y permitiendo agilidad en el ensamble.

Foto 12. Ensamble de Secciones.



A continuación se muestra una tabla con el resumen de las medidas de cada sección.

Tabla 8. Resumen Medidas por secciones.

Sección	Nombre	Longitud [mm]
S1	Cámara de admisión	370
S2	Sección Cámara de prueba	624
S3	Zona de descarga	370
S4	Soporte Ventilador auxiliar	200
	Total	1564

En la foto 13 se muestra el ensamble final del banco de ensayo mini túnel de viento, con todo su equipo de funcionamiento instalado.

Foto 13. Banco de ensayos, Mini túnel de viento

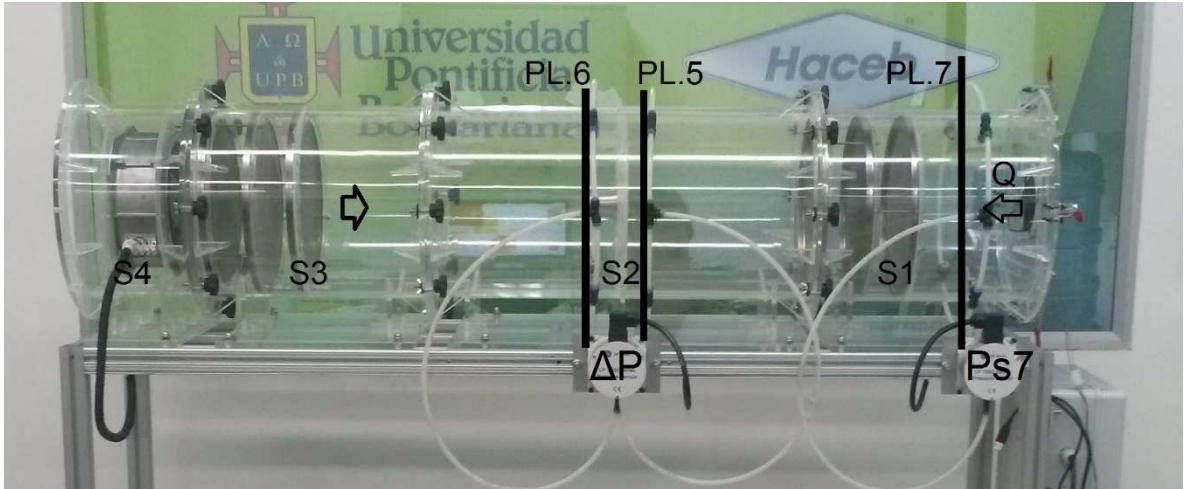


4.2 CONFIGURACIÓN BANCO DE ENSAYOS.

La operación del banco de ensayos se modifica de acuerdo al énfasis en el tipo de configuración implementada de la norma para el ensayo de los ventiladores, además del tipo de medición que se requiera para la estimación de la impedancia de un sistema de ventilación en este caso al interior de una unidad de refrigeración doméstica. A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento y se muestra un bosquejo del túnel de viento dispuesto para la configuración requerida.

Como se indicó en la sección 3.1 de este trabajo de grado, para la configuración 12 de la norma, el banco de ensayos dispone para la ubicación de las secciones del túnel de viento y el ventilador de prueba como se muestra en la foto 14, de este modo permite que la descarga del ventilador de ensayo, pueda hacerse directamente o mediante la implementación de un ducto. En consecuencia la dirección del flujo de aire para el ventilador de prueba está dirigido hacia el interior del túnel, si el propósito de la prueba del banco de ensayos, para esta configuración es medir la curva del ventilador, se enciende el ventilador de ensayo a un velocidad específica y se toma una serie de mediciones a diferentes velocidades de flujo las cuales se regula con el porcentaje del caudal en el ventilador auxiliar y el tamaño de la boquilla de medición [23]. El procedimiento de la toma de muestras se describe en el Anexo A. Para propósitos del cálculo de la densidad (como se indica en la sección 4.5), por sugerencia de la norma en el plano 5 (PL.5), se puede considerar presión estática 5 (Ps5) iguales a la presión estática 7 (Ps7)

Foto 14. Configuración 12, Banco de Pruebas mini Túnel de viento.



PL.7: Plano de medición de presión estática (Ps7).

ΔP : Presión diferencial entre los planos 5 y 6.

S1: Cámara de admisión/descarga.

S2: Cámara de prueba.

S3: Zona de descarga.

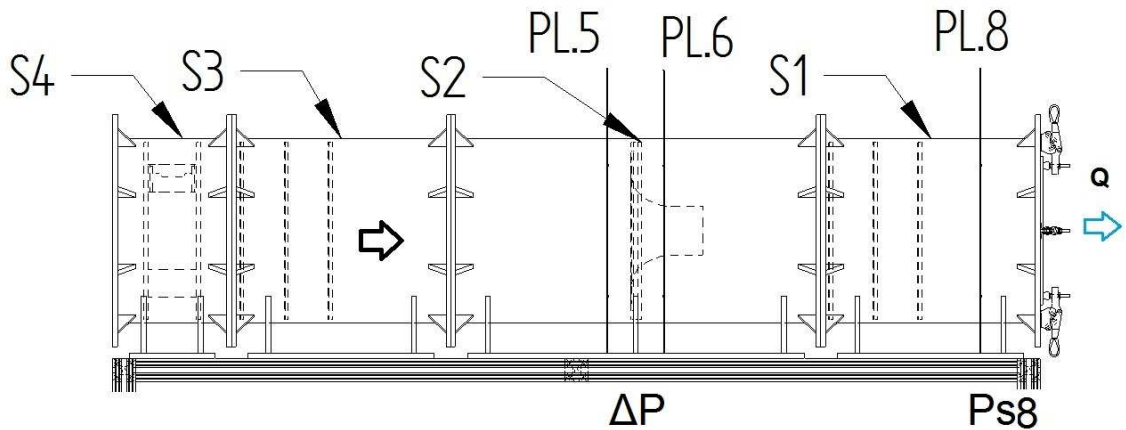
S4: Soporte Ventilador auxiliar.

Q: Caudal del ventilador de ensayo.

Respecto a la configuración 15 de la norma se invierte el sentido en la descarga de aire del ventilador de prueba y por consiguiente la sección uno ya no es de descarga si no admisión. También se requiere de modificar el sentido de la boquilla de medición o Nozzle en la cámara de pruebas, finalmente se realiza la medición de acuerdo a los nuevos planos de medición como se esquematiza en la figura 29.

La norma permite que la toma de presión en el plano 8 se realice con un tubo de medición total o un aro piezométrico para medir la presión estática en este caso si la velocidad es mayor que 400 fpm (121.92 m/min), entonces el cálculo de la presión de velocidad en el plano 8 deberá ser añadida a la medición de la presión estática. Para propósitos del cálculo de la densidad en el plano 5, se puede considerar la presión estática de plano 5 (Ps5) igual a la presión total en el plano 8 más el diferencial de presión medido en el boquilla de medición (ΔP).

Figura 29. Configuración 15, Banco de ensayos mini Túnel de Viento



PL.8: Plano de medición de presión estática (Ps8)

PL.5: Plano de medición cinco

PL.6: Plano de medición seis

ΔP : diferencial de presión entre el plano 5 y 6.

Q: Caudal de aire del ventilador de prueba

S1: sección Admisión/descarga

S2: Cámara de prueba.

S3: Zona de descarga.

S4: Soporte Ventilador auxiliar.

4.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

La presión estática en la cámara de admisión/descarga y la presión diferencial en la sección de prueba es medida por un manómetro marca GE DRUCK serie LP1000 (véase foto 15) siendo un producto especialmente diseñado para el uso y control en aplicaciones de Refrigeración, calefacción y aire acondicionado, además proporciona un monitoreo seguro para bajas presiones. Su alto rendimiento permite mediciones confiables a largo plazo durante millones de ciclos de presión sin errores de cero.

Foto 15. Sensor de presión GE DRUCK serie LP1000



La presión medida principalmente es una variable de la inductancia, provee un máximo de sensibilidad para cada pequeño cambio en la medición con un mínimo de histéresis y excelente repetitividad, con una salida de señal electrónica de 4-20mA (2 hilos), su carcasa proporciona excelente robustez y protección contra el ingreso de agua y polvo (IP 64). En la tabla 9 y tabla 10 se proporciona los datos de placa de cada sensor de presión.

Tabla 9. Sensor de Presión estática

VARIABLE	SENSOR DE PRESION- PRESION ESTÁTICA		
FABRICANTE	GE DRUCK SERIES LP 1000		
MODELO	LPX1010-C1SNW-1		
RANGO	0 A 0.5 mbar/ 0 A 50 Pa		
RESOLUCIÓN	0.02 Pa		
OUTPUT	4 A 20 mA		
SUPPLY	10 A 30 Vdc		
SERIAL No	3907028		
Cód. Barras	N00002761		
Revisó	JTANGARIFE	Aprobó	CISAZA

Tabla 10. Sensor de presión diferencial

VARIABLE	SENSOR DE PRESION- PRESION DIFERENCIAL		
FABRICANTE	GE DRUCK SERIES LP 1000		
MODELO	LPX1510-C1SNW-1		
RANGO	0 A 6.25 Mbar/ 0 A 625 Pa		
RESOLUCIÓN	0.02 Pa		
OUTPUT	4 A 20 mA		
SUPPLY	10 A 30 Vdc		
SERIAL No	3907030		
Cód. Barras	N00002760		
Revisó	JTANGARIFE	Aprobó	CISAZA

La caída de presión en las boquillas de medición varia con el diámetro del Nozzle, por esta razón cada Nozzle es apto para mediciones bajo un límite de rango de caudal de aire, el cual está dado en la tabla 11 donde se indica el máximo de caudal permitido para cada una de las boquillas de medición, por encima del caudal indicado la caída de presión puede ser más grande a la medida máxima de presión diferencial disponible 6.25 mbar (625 Pa) y no podría ser medido con precisión o dañaría el sensor. [23]

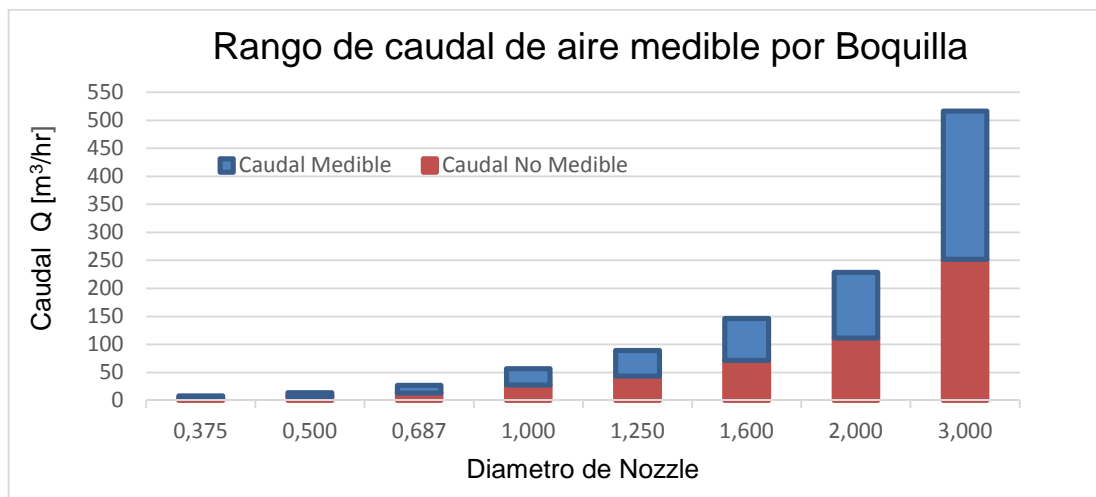
Tabla 11. Caudal de aire Máximo para cada una Boquillas de medición

Nozzle	Caudal Mínimo		Caudal Máximo	
	[m ³ /h]	CFM	[m ³ /h]	CFM
0,375	3,83	2,25	7,89	4,64
0,500	6,84	4,02	14,09	8,29
0,687	12,98	7,64	26,70	15,72
1,000	27,66	16,28	56,83	33,45
1,250	43,35	25,51	88,99	52,38
1,600	71,24	41,93	146,13	86,01
2,000	111,59	65,68	228,74	134,63
3,000	252,07	148,36	516,14	303,79

Los datos proporcionados en la tabla anterior se estimaron para un caudal de aire que tiene propiedades de aire estándar esto quiere decir a una densidad de aire de $1,2 \text{ Kg/m}^3$, a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, viscosidad de aire de $1,222 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, con una humedad del 50%.

Para un funcionamiento adecuado del túnel de viento, se debe seleccionar el Nozzle adecuado para el rango en el cual se encuentra el caudal para ser medido. A continuación se presenta una gráfica en donde se identifica en el eje de la abscisa el diámetro de la boquilla en pulgadas y en el eje de la ordena el caudal en metros cúbicos por hora, de esta manera se puede ubicar en la gráfica el rango de caudal requerido y seleccionar la boquilla más apta para su medición.

Gráfica 1. Rango de Caudal de aire medible por diámetro de boquilla



Los demás instrumentos de medición como temperatura y voltaje se muestran en el anexo E

4.4 DATOS ADQUIRIDOS.

Para una mejor referencia, se presenta una lista de símbolos y descripción de los parámetros utilizados con sus unidades respectivas para el sistema internacional (SI) en orden de aparición, con estos parámetros más el modelo de cálculo de la sección 4.5, se puede calcular la densidad, el caudal, la potencia, la eficiencia del ventilador.

Tabla 12. Lista de parámetros utilizados para los cálculos.

SÍMBOLO	DESCRIPCIONES	UNIDADES
P_b	Presión barométrica	Pa
N	Velocidad Rotacional	Rpm
W	Potencia eléctrica del ventilador	W
T_{d0}	Temperatura bulbo seco	°C
T_{w0}	Temperatura bulbo húmedo	°C
T_{d2}	Temperatura descarga ventilador de prueba	°C
t_{d8}	Temperatura en la plano 8	°C
HR	Humedad relativa	%
R	Constante gases	J/kg*k
P_{s7}	Presión estática plano 7= P_{s5}	Pa
t_{d5}	Temperatura en la sección 5	°C
P_e	Presión Saturación vapor	Pa
P_p	Presión parcial de vapor	Pa
ρ_0	densidad del aire	kg/m ³
ρ_x	Densidad del aire atmosférico en el túnel $\rho_x=\rho_2$	kg/m ³
ρ	Densidad del aire en el ventilador	kg/m ³
μ	Viscosidad μ	Pa*s
ΔP	Presión Diferencial	Pa
α	Relación Alfa	-
D_5	Diámetro plano 5 = Diámetro del túnel de viento	m
D_6	Diámetro salida Nozzle	m
β	Relación beta	-
Y	Factor de expansión	-
E	Factor de energía	-
Re	Número de Reynolds	-

SÍMBOLO	DESCRIPCIONES	UNIDADES
ce	Coeficiente de descarga estimado	-
C	Coeficiente de descarga	-
A6	Área Nozzle plano 6	m ²
Q5	Caudal en Nozzle	m ³ /s
Q	Caudal corregido	m ³ /s
Q2	Caudal a la salida del ventilador	m ³ /s
ρ2	Densidad del aire a la salida del ventilador	kg/m ³
V2	Velocidad del aire en el túnel	m/s
D2	Diámetro aspa del ventilador	m
A2	Área de entrada de la cámara	m ²
Pv	Presión de velocidad	Pa
Pt1	Presión total admisión ventilador	Pa
Pt2	Presión total del túnel	Pa
Pt	Presión Total del ventilador	Pa
Ps	Presión estática del ventilador en condición de prueba	Pa
H	Potencia de entrada del ventilador	W
η	Eficiencia eléctrica	-
Ho	Potencia de salida del ventilador	W
X	Factor X	-
Z	Factor Z	-
Kp	Factor de compresibilidad	-
η _t	Eficiencia Total Ventilador	-
η _s	Eficiencia estática del ventilador	-

Los datos recopilados en el banco de ensayos deben incluir una descripción del ventilador de prueba, sus dimensiones y datos de placa del mismo.

Una especificación del tipo de configuración utilizado en el test, diámetros de las boquillas de medición utilizados y como mínimo los siguientes parámetros mencionados en la tabla 13, como datos de entrada.

Tabla 13. Datos Registrados de acuerdo a la configuración del túnel de viento.

Descripción	Parámetro		Configuración de prueba	
	Símbolo	SI	12	15
Presión barométrica	P_b	Pa	x	x
Velocidad rotacional	N	Rpm	x	x
Potencia de entrada	W	W	x	x
Presión estática	P_{s7}	Pa	x	-
	P_{s8}	Pa	-	x
Humedad relativa	HR	%	x	x
Temperatura	t_{d0}	°C	x	x
	t_{w0}	°C	x	x
	t_{d2}	°C	x	x
	t_{d5}	°C	x	x
	t_{d8}	°C	-	x
Caída de presión Nozzle	ΔP	Pa	x	x

Cuando una corrección por calibración sea requerida se deberá aplicar a lecturas individuales antes de promediar o antes de la realización de cálculos, si es en equipos deberá hacerse según lo informado por el fabricante.

4.5 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

A partir de los datos adquiridos anteriormente, el modelo de cálculo se describe a continuación según el tipo de configuración utilizado para el ensayo de un ventilador, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

Cuando las condiciones ambientales son variantes, se deberá realizar un mínimo de tres lecturas para t_{d0} , t_{w0} , t_{d2} y P_b , la temperatura de bulbo seco y presión de saturación del vapor pueden ser leídas de una carta psicométrica a la altura en la que se encuentre el banco de ensayos (1800 msnm para este caso).

Para la configuración 12 la t_{d2} puede ser considerada igual a t_{d5} y P_{s5} puede ser considerada igual P_{s7}

El siguiente modelo de cálculo es recomendado por la norma para la estimación variables como la densidad, caudal, presión velocidad, entre otras.

4.5.1 Densidad atmosférica.

La densidad atmosférica (ρ_0) se estima a partir de las condiciones ambientales con las siguientes ecuaciones:

$$P_e = 3.25t_{w0}^2 + 18.6t_{w0} + 692 \quad \text{Eq. 2}$$

$$P_p = P_e - P_b \left(\frac{t_{d0} - t_{w0}}{1500} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\rho_0 = \frac{P_b - 0.378P_p}{R(t_{d0} + 273.15)} \quad \text{Eq. 4}$$

4.5.2 Densidad en la cámara.

La densidad de la cámara se calcula a partir de la ecuación 5, donde el subíndice x especifica las condiciones en el plano de medición x usado.

$$\rho_x = \rho_0 \left[\frac{t_{d0} + 273.165}{t_{dx} + 273.15} \right] \left[\frac{P_{sx} + p_b}{p_b} \right] \quad \text{Eq. 5}$$

4.5.3 Densidad en el ventilador

Para la configuración 12 P_{t1} es igual a cero y t_{s1} es igual a t_{d0} . Para la configuración 15 P_{t1} es igual P_{s8} y t_{s1} igual a t_{d8}

$$\rho = \rho_0 \left[\frac{P_{t1} + p_b}{p_b} \right] \left[\frac{t_{d0} + 273.15}{t_{s1} + 273.15} \right] \quad \text{Eq. 6}$$

4.5.4 Viscosidad dinámica del aire.

La viscosidad dinámica del aire se calcula en el plano 5 a partir de la ecuación 7 en Pa*s

$$\mu = (17.23 + 0.048t_{d5}) * 10^{-6} \text{Eq. 7}$$

4.5.5 Caudal en la cámara de medición

El caudal en la cámara de medición en condiciones de prueba es calculado a partir de la presión diferencial a través de un Nozzle y las siguientes relaciones:

$$\alpha = 1 - \left\{ \frac{\Delta P}{\rho_x R [t_{d5} + 273.15]} \right\} \text{ Eq. 8}$$

$$\beta = \frac{D_6}{D_5} \text{ Eq. 9}$$

$$Y = 1 - (0.548 + 0.71\beta^4)(1 - \alpha) \text{ Eq. 10}$$

Por sugerencia de la norma, para ambas configuraciones el factor de energía E=1.0 para cámara y E=1.043 para ducto.

Con las relaciones anteriores y el factor de descarga se calcula el número de Reynolds y el coeficiente de descarga para una relación L/D igual a 0.6 mediante una iteración disponible en el anexo C.

$$Re = \frac{\sqrt{2}}{\mu} C D_6 Y \sqrt{\frac{\Delta P \rho_x}{1 - E\beta^4}} \text{ Eq. 11}$$

$$C = 0.9986 - \left(\frac{6.6888}{\sqrt{Re}} \right) + \left(\frac{131.5}{Re} \right) \text{ Eq. 12}$$

$$Q_5 = Y \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_5}} C A_6 \text{ Eq. 13}$$

4.5.6 Caudal del ventilador.

El caudal del ventilador en condiciones de prueba se calcula por la relación de densidades entre las cámaras como se indica en la ecuación 14.

$$Q = Q_5 \left(\frac{\rho_5}{\rho} \right) \text{ Eq. 14}$$

4.5.7 Presión de velocidad.

A partir del cálculo del caudal, la presión de velocidad se estima de la velocidad y la densidad en la descarga del ventilador así:

$$Q_2 = Q \left(\frac{\rho}{\rho_2} \right) \text{ Eq. 15}$$

$$V_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) \text{ Eq. 16}$$

$$P_v = \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \text{ Eq. 17}$$

4.5.8 Presión total en condiciones de prueba:

Cuando la admisión del ventilador es abierto a la atmosfera la presión total 1 es igual a cero (manométrica) y la descarga es directamente a cámara (configuración 12) la Presión total a la salida del ventilador es

$$P_{t2} = P_{s7} + P_v \quad \text{Eq. 18}$$

Cuando la descarga es directamente a la atmosfera la presión estática 2 (P_{s2}) deberá considerarse igual a la atmosférica (configuración 15)

$$P_{t2} = P_v \quad \text{Eq. 19}$$

4.5.9 Presión total ventilador.

La presión total en condiciones de prueba es calculada por la diferencia entre la presión total a la entrada y a la salida

$$P_t = P_{t2} - P_{t1} \quad \text{Eq. 20}$$

Y la presión estática del ventilador en condiciones de prueba es

$$P_s = P_t - P_v \quad \text{Eq. 21}$$

4.5.10 Potencia del ventilador

La potencia de entrada al ventilador, está restringida por la eficiencia eléctrica

$$H = W\eta \quad \text{Eq. 22}$$

Y la potencia de salida del ventilador es proporcional al producto del caudal de aire y la presión total para un fluido incompresible, debido a que el aire es compresible, es aplicada un coeficiente de compresibilidad (K_p)

$$H_o = QP_tK_p \quad \text{Eq. 23}$$

Este coeficiente de compresibilidad es determinado por recomendación de la norma a partir de 3 parámetros:

$$x = \frac{P_t}{P_{t1} + \rho_b} \quad \text{Eq. 24}$$

$$z = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \left(\frac{\left[\frac{H}{Q} \right]}{P_{t1} + \rho_b} \right) \quad \text{Eq. 25}$$

$$K_p = \left(\frac{\ln(1+x)}{x} \right) \left(\frac{z}{\ln(1+z)} \right) \text{ Eq. 26}$$

4.5.11 Eficiencia total y estática del ventilador.

Finalmente la eficiencia en relación a la potencia de entrada y salida o eficiencia total es:

$$\eta_t = \frac{Q P_t K_p}{H} \text{ Eq. 27}$$

Además se puede calcular la eficiencia estática como la eficiencia total por el producto de la relación de presión estática:

$$\eta_s = \eta_t \frac{P_s}{P_t} \text{ Eq. 28}$$

5. EVALUACION DE UN VENTILADOR.

Con la implementación del banco de ensayos mini túnel de viento, se realizó la curva característica para cuatro tipos de moto ventiladores axiales de los refrigeradores domésticos. En la foto 16 se muestra tres de los dispositivos de prueba ventilador Axial AC 1-6W derecha, AC 2-12W centro y el Ventilador axial AC 3 izquierda. Cada uno de estos ventiladores se evaluó bajo la configuración 12, implementando cada una de las boquillas de medición disponible para la medición de caudal.

Foto 16. Moto Ventiladores de prueba.



Los datos presentados a continuación se adquirieron mediante el procedimiento obtención de datos descrito en el anexo A para el uso correcto del mini túnel de viento, asimismo se utilizó una plataforma virtual especialmente diseñada para el monitoreo de las variables de muestreo mediante la implementación del software de medición y control *LABVIEW®*. Programado con la ayuda del grupo de automatización y control (A+D) de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la tabla 14 se muestran las condiciones ambientales en las cuales se realizaron las pruebas a los ventiladores. Además con el apoyo de una hoja de cálculo en Excel se estima el valor del caudal de aire a través del ventilador con la formulación matemática descrita en el capítulo anterior.

Tabla 14. Condiciones ambientales de prueba

Ítem	Símbolo	Unidad	Valor
Presión barométrica	Pb	Pa	85200
Humedad relativa	HR	%	56,45
Temperatura de bulbo seco atmosférico	t _{do}	°C	20
Presión parcial de vapor	Pp	Pa	1242,96
Altura m.s.n.m	Al	m	1800
densidad del aire	ρ ₀	kg/m ³	1,0065

A continuación se muestra los registros obtenidos por cada ventilador.

5.1 Ventilador axial DC 1

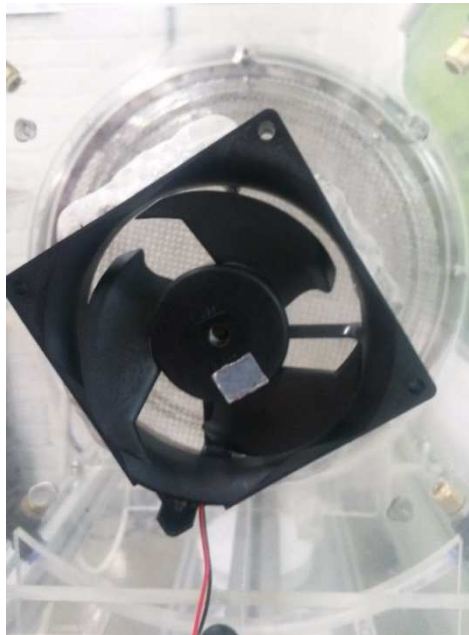
Es un moderno Ventilador axial de corriente directa utilizado en neveras con un volumen 320 Litros. En la siguiente tabla se presenta la caracterización del moto ventilador.

Tabla 15. Caracterización motoventilador Axial DC 1.

MOTO VENTILADOR AXIAL DC 1					
MARCA	NMB eminebea	SENTIDO DE GIRO	CW	RPM	2800
VOLTAJE [V]	12	CORRIENTE [A]	0,110	FUENTE	DC
NÚMERO ASPAS	3	POTENCIA [W]	1,32	dB	29,5
DIÁMETRO ASPA [Cm]	9,82	FRECUENCIA [Hz]	60	Hrs. de Fun	70000

Es fabricado en plástico UL94V-0, con rodamiento de cilindros que proporciona bajos niveles de ruido, y con una temperatura de trabajo en un rango de -40°C a 40°C en operación o 70°C en estado pasivo. En la foto 17 se muestra una imagen del mismo.

Foto 17. Moto Ventilador Axial DC 1



Los registros para el ventilador de prueba ensayo DC 1 a velocidad nominal, se presenta como ejemplo en las tabla 16 a la tabla 23. Los puntos sobre la curva característica del ventilador se obtuvieron, determinando primero el punto de operación donde el caudal de descarga del ventilador es cero y la presión estática es máxima o *shut off* (SO), en un segundo paso se determina el punto de operación de caudal máximo entregado *free delivery* (FD) y luego con la variación del porcentaje de funcionamiento del ventilador auxiliar se determinaron otros puntos de operación para diferentes caudales. Para los demás ventiladores de prueba se muestran en el anexo B

Tabla 16. Mediciones boquilla 3.00"

Nozzle 3,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	44,408	-0,403	-	-	0
FD	0,399	12,565	79,56	46,828	34
1	5,232	10,693	74,22	43,681	24
2	12,715	8,057	64,24	37,810	0

Tabla 17. Mediciones boquilla 2.00"

Nozzle 2,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	45,985	-0,055	-	-	0,000
FD	0,631	56,262	76,19	44,845	69
1	4,839	49,078	71,16	41,883	59
2	9,565	41,729	65,46	38,528	49
3	14,046	34,418	59,35	34,931	39
4	17,839	28,808	54,21	31,906	29
5	21,951	24,908	50,34	29,627	19
6	21,909	18,588	43,37	25,524	0

Tabla 18. Mediciones boquilla 1.60"

Nozzle 1,600"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	44,145	-0,588	-	-	0,000
FD	0,229	108,231	67,73	39,864	93
1	6,125	90,771	61,94	36,457	73
2	10,664	74,282	56,04	32,981	53
3	17,069	56,037	48,47	28,530	33
4	21,380	38,337	39,96	23,518	13
5	22,954	20,905	29,34	17,266	0

Tabla 19. Mediciones boquilla 1.250"

Nozzle 1,250"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	45,109	-0,531	-	-	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	18,948	114,562	42,37	24,935	100
2	23,491	100,691	39,67	23,352	80
3	20,824	70,426	33,08	19,472	60
4	22,391	48,003	27,22	16,020	40
5	26,775	33,735	22,74	13,383	20

Tabla 20. Mediciones boquilla 1.00"

Nozzle 1,000"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	45,218	0,299	0,00	0,000	0
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	20,338	119,778	27,62	16,254	100
2	20,985	101,157	25,35	14,921	80
3	24,180	75,916	21,90	12,892	60
4	27,142	54,943	18,58	10,934	40
5	30,124	38,57	15,51	9,128	20
6	31,567	30,687	13,80	8,122	0

Tabla 21. Mediciones boquilla 0.687"

Nozzle 0,687"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	30,075	0,364	0,00	0,000	0
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	26,329	128,830	13,43	7,906	100
2	28,323	110,815	12,44	7,322	80
3	30,101	83,522	10,77	6,339	60
4	32,079	61,217	9,19	5,409	40
5	33,973	42,83	7,66	4,507	20
6	34,902	34,211	6,83	4,018	0

Tabla 22. Mediciones boquilla 0.500"

Nozzle 0,500"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	34,814	0,363	0,000	0,000	0
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	29,276	131,944	7,15	4,211	100
2	30,115	113,983	6,64	3,908	80
3	31,848	86,292	5,76	3,390	60
4	33,508	62,644	4,89	2,878	40
5	35,203	44,042	4,08	2,404	20
6	36,642	35,654	3,67	2,158	0

Tabla 23. Mediciones boquilla 0.375"

<i>Nozzle 0,375"</i>	<i>Pe [Pa]</i>	<i>ΔP [Pa]</i>	<i>Q [m³/h]</i>	<i>Q [CFM]</i>	<i>Ventilador Aux. [%]</i>
<i>Ensayo</i>					
SO	35,050	0,089	0,000	0,000	0
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	29,988	133,289	4,02	2,366	100
2	31,232	114,749	3,72	2,191	80
3	32,831	87,055	3,23	1,903	60
4	34,377	63,521	2,75	1,620	40
5	36,029	45,068	2,31	1,359	20
6	36,640	35,802	2,05	1,208	0

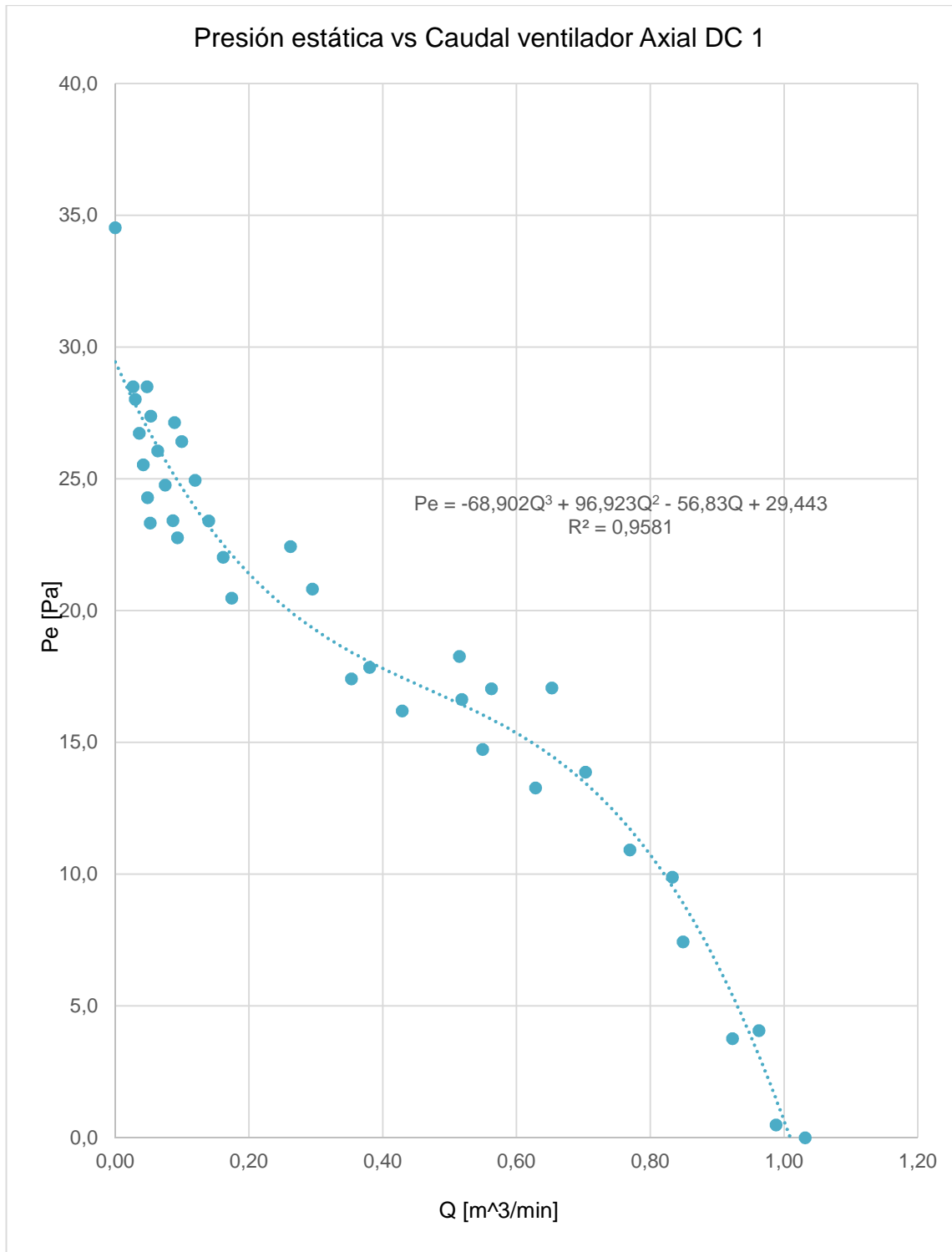
Con esta información obtenida con el túnel de viento, en la gráfica 2 se muestra la curva característica obtenida con el banco de ensayos para el ventilador DC 1. Igualmente se puede observar que este ventilador tiene un punto máximo de presión estática de 34.539Pa. Con un mínimo caudal de aproximadamente 0 m³/min, mientras que el máximo caudal entregado por este ventilador en esta prueba fue de 1,031m³/min con un presión estática de aproximadamente 0 Pa.

Se realizó un ajuste polinómico grado 3 para encontrar la ecuación que se aproxima a la curva característica del ventilador teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$Pe = -68,902Q^3 + 96,923Q^2 - 56,83Q + 29,443 \text{ Eq.R1}$$

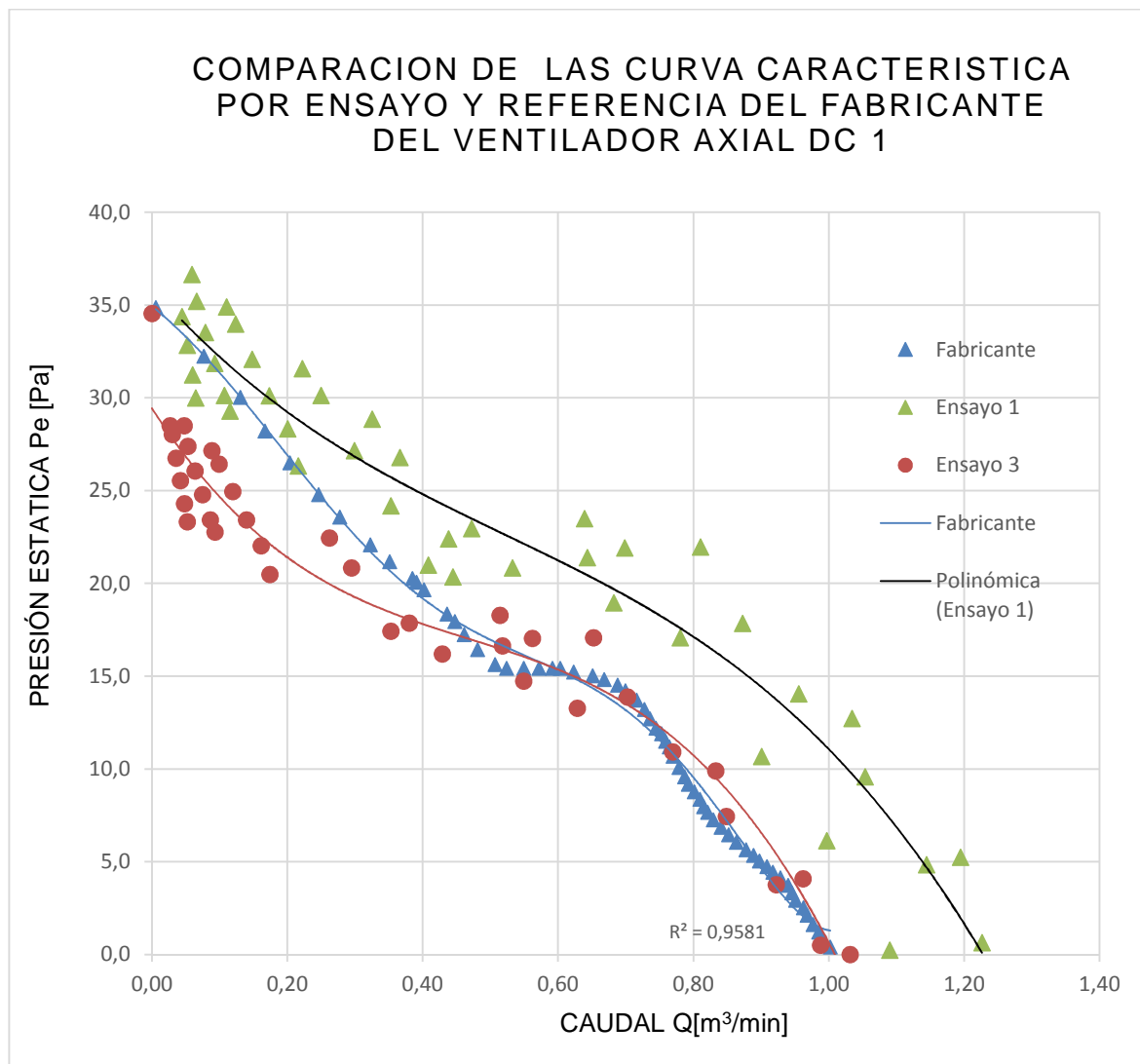
El ajuste de la curva o R cuadrado de la ecuación es de 0,9581, siendo un valor razonable para este tipo de gráficas, además tiene un rango de caudal entre 0 y 1 metro cubico por minuto y un rango de presión estática entre 0 y 35,539 pascales.

Gráfica 2. Curva Característica Ventilador Axial DC 1 obtenida en el ensayo



En una comparación entre la curva característica reportada por el fabricante en la ficha técnica del equipo, disponible en el anexo E, y la obtenida con el banco de ensayos mini túnel de viento, en especial el ensayo 3, se logró observar que ambas curvas tienen un comportamiento similar, dentro del rango de caudal de 0,262 hasta 1,2 metro cubico por minuto para un rango de presión estática de 0,2 a 22,440 Pascales. Además durante los dos primeros ensayos preliminares realizados con el mini túnel de viento se observó una disparidad debido a errores de calibración del túnel de viento y de medición. Ambos ensayos y la curva característica del fabricante se muestra en la gráfica 3.

Gráfica 3. Comparación de los ensayos obtenidos con el túnel de viento y la curva características reportada por el fabricante del ventilador Axial DC 1

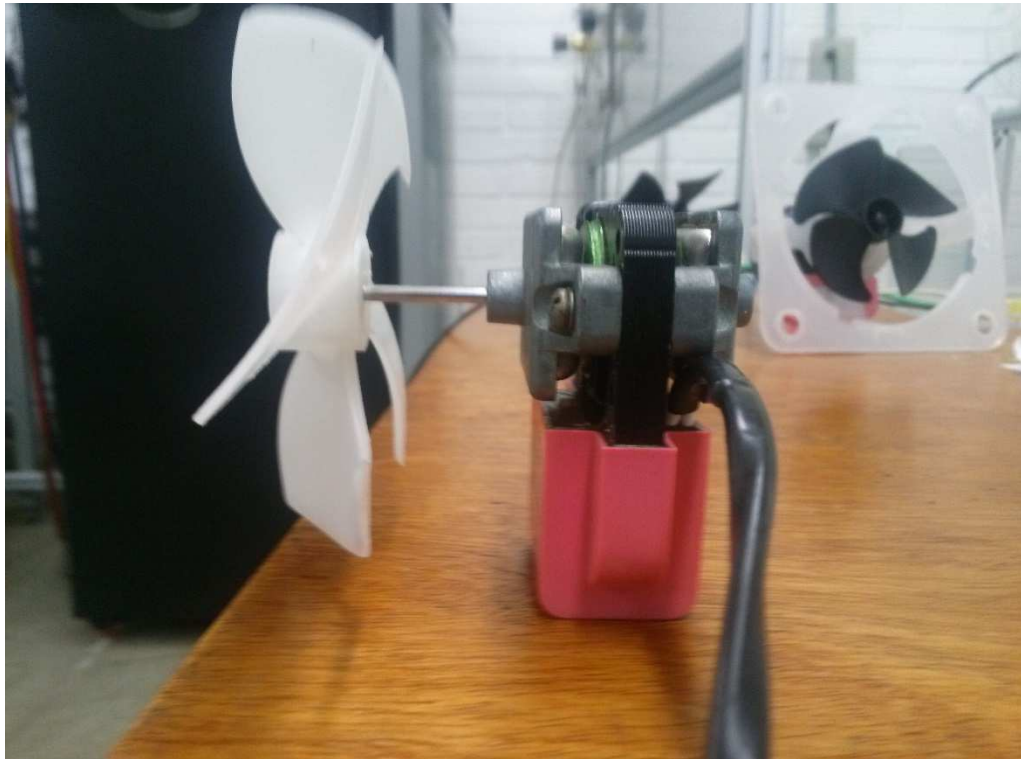


5.2 Ventilador axial AC 1-6W.

Es un ventilador axial de corriente alterna compuesto principalmente por un motor marca Hunan KELI. Este modelo de hélice en plástico intercambiable, es el ventilador de referencia para los diferentes modelos de refrigeradores domésticos de prueba en especial neveras N305L, N345L. Además, este tipo de ventilador ofrece la posibilidad de utilizar hélices de diferentes diámetros que están en un rango de 90 mm a 114 mm e igualmente se pueden variar entre cuatro y cinco el número de aspas. Este modelo de ventiladores no cuenta con una curva reportada o referencia por el fabricante.

Para mayor información en los diámetros de hélices implementados según el volumen bruto del refrigerador domestico mirar el anexo F.

Foto 18. Moto Ventilador Axial AC 1-6W, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas.



En la tabla 24 se realiza una caracterización de este ventilador usado comúnmente en neveras de 305 y 345 litros, implementando en este ensayo una hélice

de plástico de 90 milímetro de diámetro y de cuatro aspas. Intercambiando la potencia del motor de 6 y 12 watt.

Tabla 24. Caracterización motoventilador Axial AC 1-6W

MOTO VENTILADOR AXIAL AC 1-6W					
MARCA	Hunan Keli	SENTIDO DE GIRO	CW	RPM	2140
VOLTAJE [V]	12	CORRIENTE [A]	0,110	FUENTE	CA
NÚMERO ASPAS	4	POTENCIA [W]	6	dB	43,0
DIÁMETRO ASPA [Cm]	9	FRECUENCIA [Hz]	60	Hrs. de Fun	3000

En la curva característica de este ventilador se reportó una presión estática máxima de 16,64 Pascales, para un caudal aproximadamente igual a cero y el punto de descarga máxima con un caudal de 1,3 metro cubico por minuto y una presión aproximada de 0 Pascales

Se realizó un ajuste polinómico grado 5 para encontrar la ecuación que se aproxima a la curva característica del ventilador teniendo como resultado la siguiente ecuación:

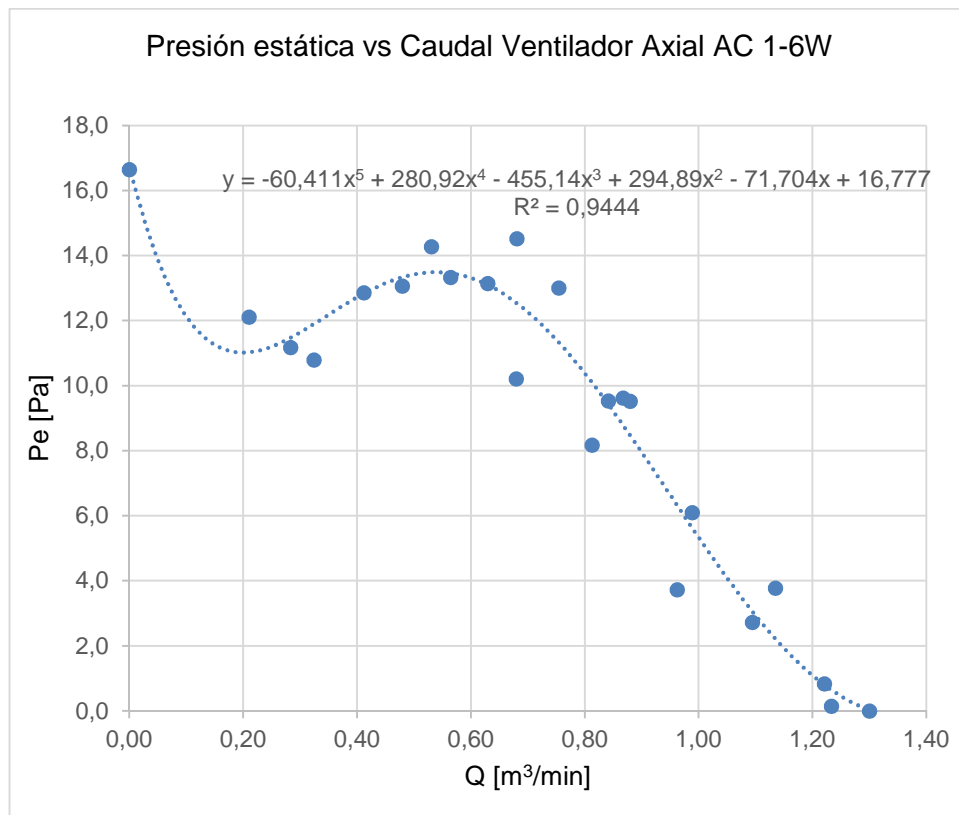
$$Pe = -60,411Q^5 + 280,92Q^4 - 455,14Q^3 + 294,89Q^2 - 71,10Q + 16,777 \text{ Eq.R2}$$

El ajuste de la curva o R cuadrado de la ecuación es de 0,944, siendo un valor razonable para este tipo de gráficas, tiene un rango de caudal entre 0 y 1,3 metro cubico por minuto y un rango de presión estática entre 0 y 16,64 pascales

Foto 19. Datos de placa moto Ventilador Axial AC 1-6W.



Gráfica 4. Curva Característica Ventilador Axial AC 1-6W



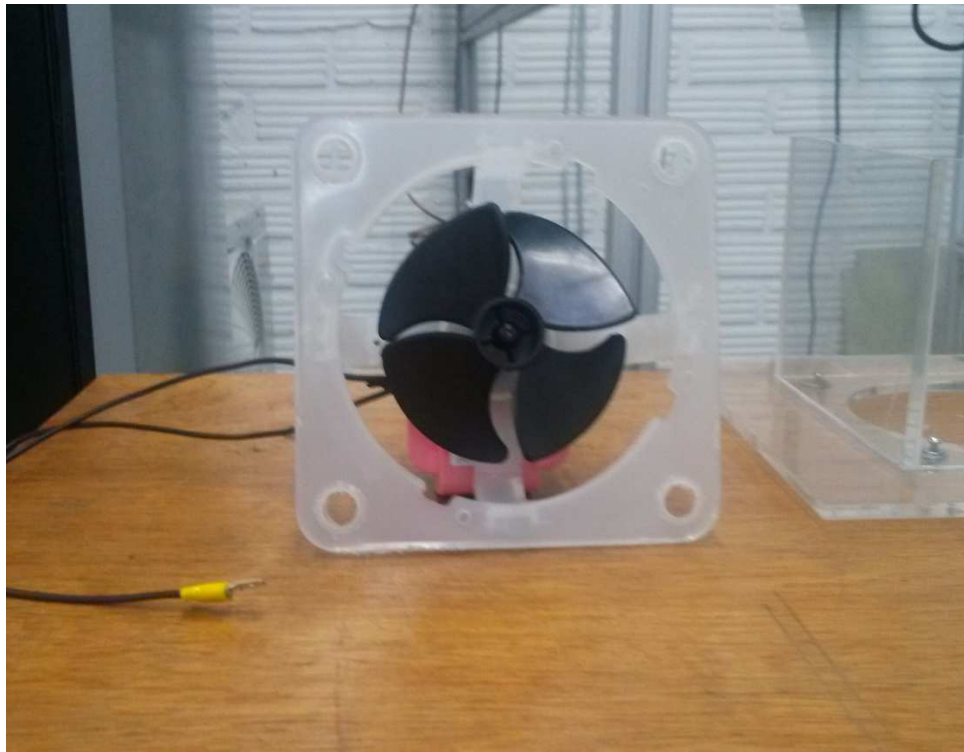
5.3 Ventilador axial AC 2-12W

Su motor permite obtener una mayor potencia entregada a la hélice en comparación del anterior, además tiene mayor velocidad rotacional pero como restricción para este ensayo tiene el mismo tipo de hélice que el ventilador axial semejante de 6W, de este modo se pudo relacionar cómo afecta la potencia entregada por el motor en la curva característica del ventilador.

Tabla 25. Caracterización motoventilador Axial AC 2-12W

MOTO VENTILADOR AXIAL AC 2-12W					
MARCA	Hunan keli	SENTIDO DE GIRO	CW	RPM	2700
VOLTAJE [V]	115	CORRIENTE [A]	-	FUENTE	CA
NÚMERO ASPAS	4	POTENCIA [W]	12	dB	43
DIÁMETRO ASPA [Cm]	9,00	FRECUENCIA [Hz]	60	Hrs. de Fun	3000

Foto 20. Moto Ventilador Axial AC 2-12W, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas



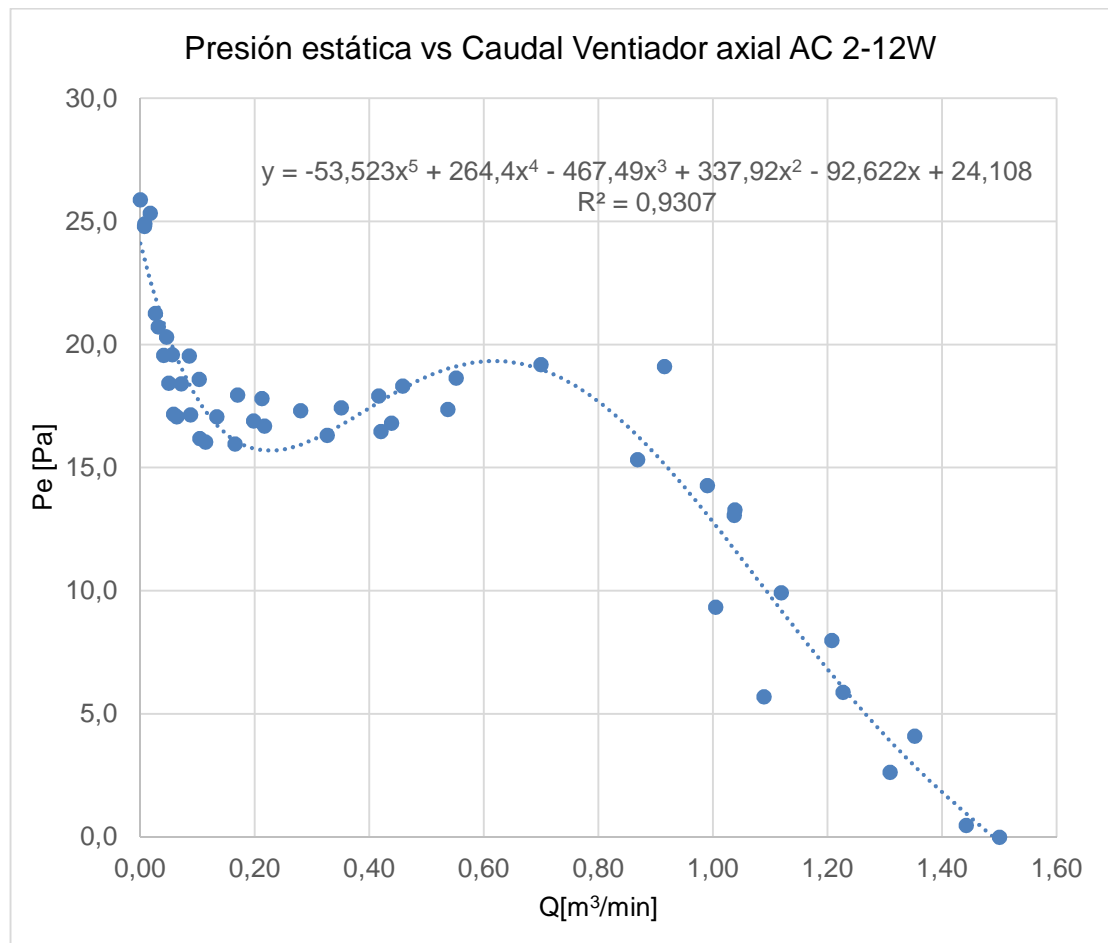
En una análisis a esta prueba se observó un aumento en el rango de operación de la curva característica del ventilador Axial AC 2-12W (ver grafica 5), de este modo para el punto de presión estática máxima (*Shutt off*) la presión aumento en 9,23 Pascales más que su semejante de 6W alcanzando una presión máxima de 25,329 pascales. Además el caudal máxima entregado (*Free delivery*) por este ventilador es de 1,5 metro cubico por minuto, para un incremento del 25% del caudal en comparación del moto ventilador Axial de 6W.

Seguidamente se realizó un ajuste polinómico grado 5 para encontrar la ecuación que más se aproxima a la curva característica del ventilador teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$Pe = -53,5231Q^5 + 264,4Q^4 - 467,49Q^3 + 337,92Q^2 - 92,62Q + 24,108 \text{ Eq.R3}$$

El ajuste de la curva o R cuadrado de la ecuación es de 0,9307, siendo un valor moderado para este tipo de gráficas, tiene un rango de caudal entre 0 y 1,5 metro cubico por minuto y un rango de presión estática entre 0 y 25,885 pascales

Gráfica 5. Curva Característica Ventilador Axial 2-12W



5.4 Ventilador axial AC 3

Este tipo de moto ventilador encapsulado fabricado por la empresa china OH-SUNG tiene características semejantes a los ventiladores de corriente alterna probados ya que es un ventilador axial de hélice intercambiable y con un Angulo de ataque de 45 grados, es una de las referencia más empleadas por algunas empresas nacionales en su neveras, es robusto de larga duración, su potencia nominal es 9,66 W posicionándose en consumo entre el ventilador de 6 y 12 watts.

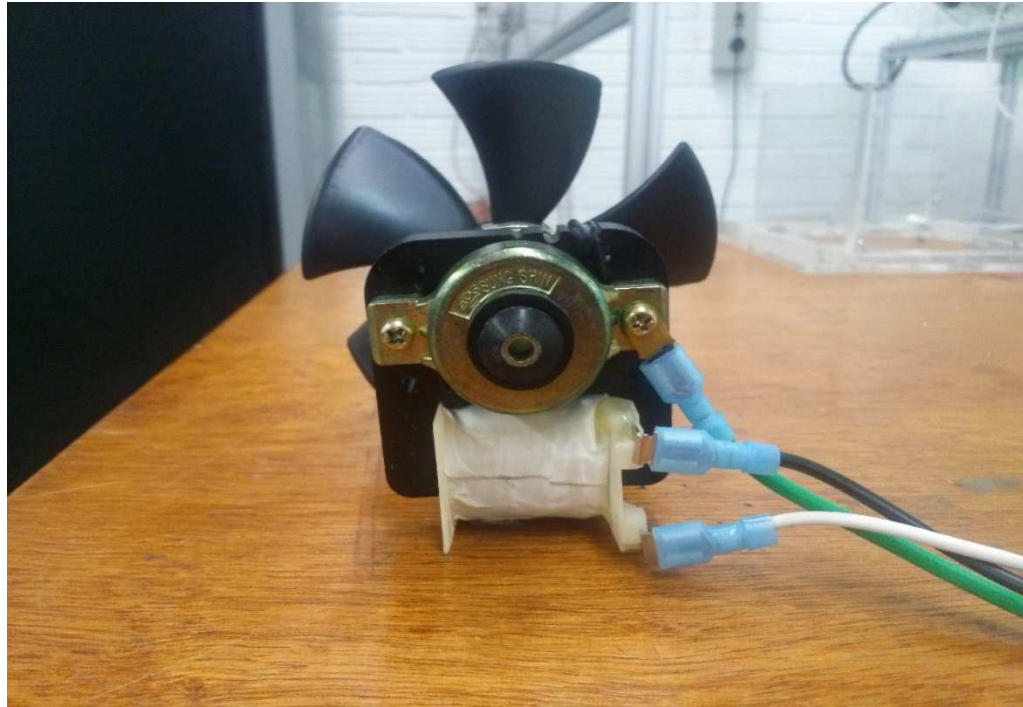
A continuación se presenta registro fotográfico para el ventilador Axial AC 3 y una caracterización del mismo

Tabla 26. Caracterización motoventilador Axial AC 3

MOTO VENTILADOR Axial AC 3					
MARCA	Oh-sung	SENTIDO DE GIRO	CW	RPM	2550
VOLTAJE [V]	115	CORRIENTE [A]	0,084	FUENTE	CA
NÚMERO ASPAS	4	POTENCIA [W]	9,66	dB	35
DIÀMETRO ASPA [Cm]	9,00	FRECUENCIA [Hz]	60	Hrs. de Fun	-

Durante su funcionamiento se puedo identificar que su motor es uno de los más ruidosos en comparación de los tres dispositivos anteriormente mencionados, sin embargo su nivel de ruido se encuentra dentro del margen establecido para la implementación y disposición en el refrigerador doméstico.

Foto 21. Moto Ventilador Axial AC 3, diámetro de hélice 90 mm y cuatro aspas



Con los datos adquiridos en el ensayo con el mini túnel de viento se pudo identificar para el ventilador axial AC 3 que en su curva característica el punto de operación de presión estática máxima con caudal mínimo es de 20,161 Pascales y un caudal aproximadamente de 0m³/min.

Esta presión decrece con el aumento del caudal hasta una presión de 12,327 Pa y un caudal de 0,276 metros cúbicos por minuto, luego de este punto existe un crecimiento de la presión hasta 14,715 Pa con un caudal de 0,424 m³/min, posteriori a este punto la presión vuelve a decrecer con el aumento de caudal proporcionando un caudal máximo de 1,11 m³/min y una presión estática de aproximadamente 0 Pa.

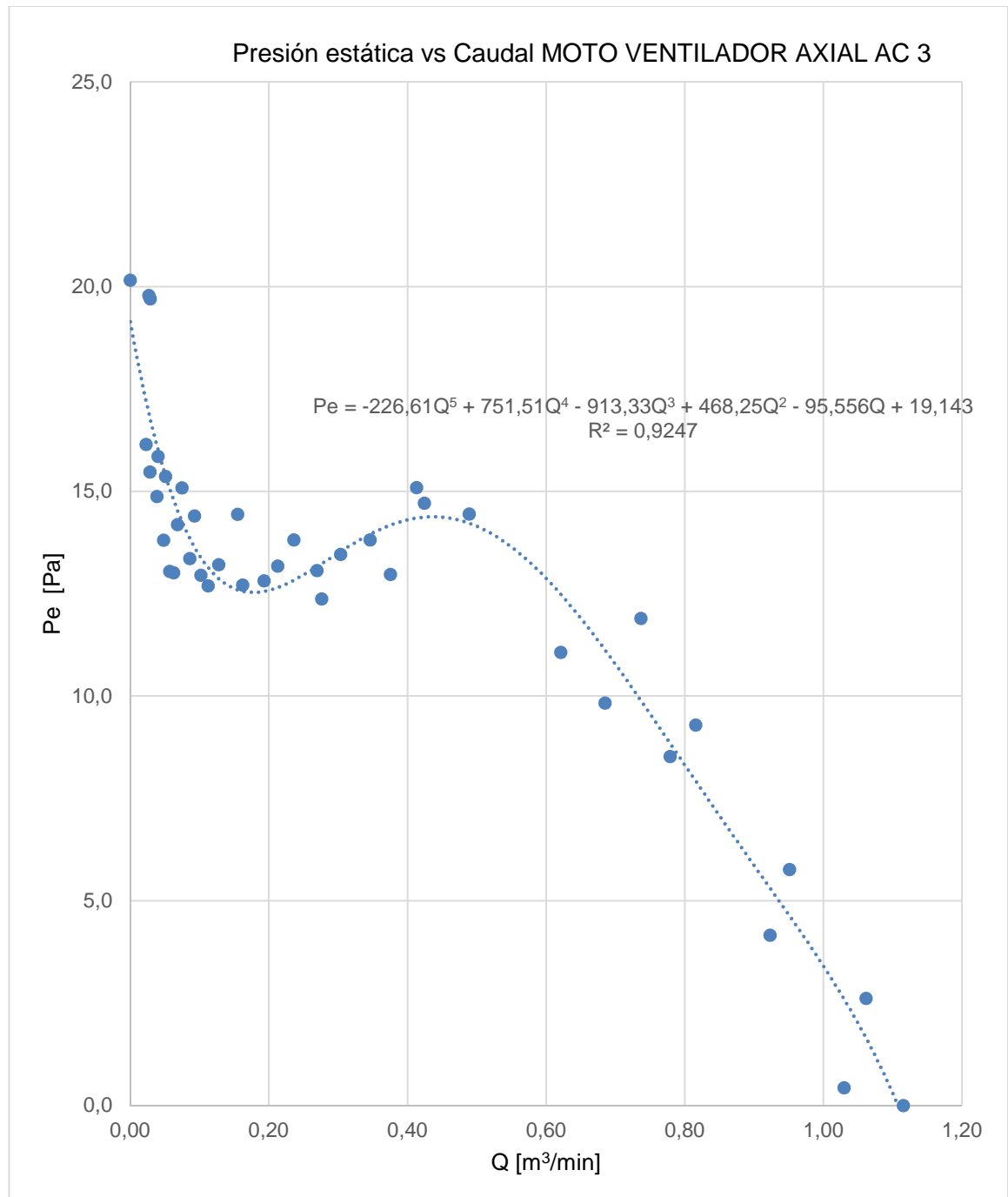
Se realizó un ajuste polinómico grado 5 con el fin de encontrar la curva que más se ajuste al comportamiento del ventilador, como resultado se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Pe = -226,61Q^5 + 751,51Q^4 - 913,33Q^3 + 468,25Q^2 - 95,556Q + 19,143$$

Eq.R3

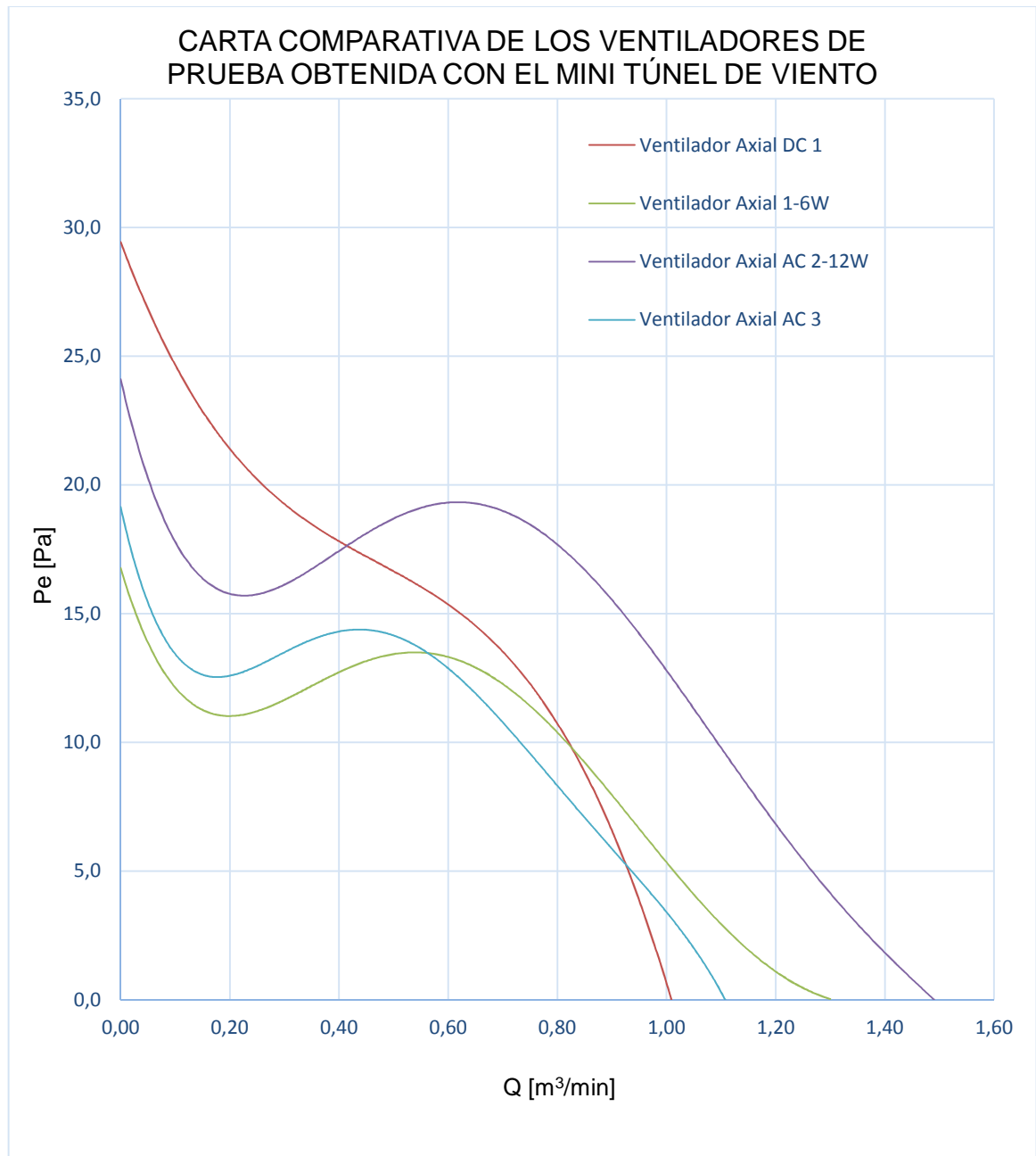
El ajuste de la curva o R cuadrado de la ecuación es de 0,9247, siendo un valor moderado para este tipo curvas características, tiene un rango de caudal entre 0 y 1,115 metro cubico por minuto y un rango de presión estática entre 0 y 20,161 Pascales

Gráfica 6. Curva Característica Moto Ventilador Axial AC 3



Los resultados obtenidos mediante la implementación del túnel de viento son resumidos en la siguiente carta de comparación de los ventiladores de prueba, con el fin de ilustrar el comportamiento de cada ventilador.

Gráfica 7. Carta de Ventiladores de prueba y comparación por curva características



5.5 Caracterización del refrigerador doméstico.

Se utilizó como referencia de estudio un refrigerador doméstico vertical sin escarcha (no frost) de 244 Litros tipo vertical de dos puertas. En su parte superior se encuentra ubicado el compartimiento de congelación con un volumen de 62,59 Lt, y en la parte inferior el compartimiento de conservación de 180.91 Lt. La circulación de aire es proporcionada por un ventilador axial ubicado junto el evaporador en el congelador y dispone de un regulador para controlar el aire en el conservador.

Figura 30. Nevera 244L, Refrigerador de estudio.



Fuente: Nevera 244L, <http://www.lumma.com.html>, consultado el 05 de Julio 2014.

Como esta clase de nevera tiene dos compartimientos se puede registrar dos caudales diferentes para cada compartimiento, y los cuales sumados establecerían el caudal total que circula al interior del refrigerador. De igual forma se establecería dos impedancias y de esta manera se determina curva característica del sistema. Por practicidad en este ensayo se optó por tomar un

rango de estudio entre 0,2 y 0,8 metros cúbicos por minuto como el rango de caudal de aire total requerido al interior del refrigerador de estudio [24], además se tomó la densidad del aire al interior del refrigerador igual a la densidad del aire en el ambiente, las pérdidas ocasionadas por longitud de tubería fueron despreciadas. En la foto 22 se muestra los datos de placa de la nevera de prueba.

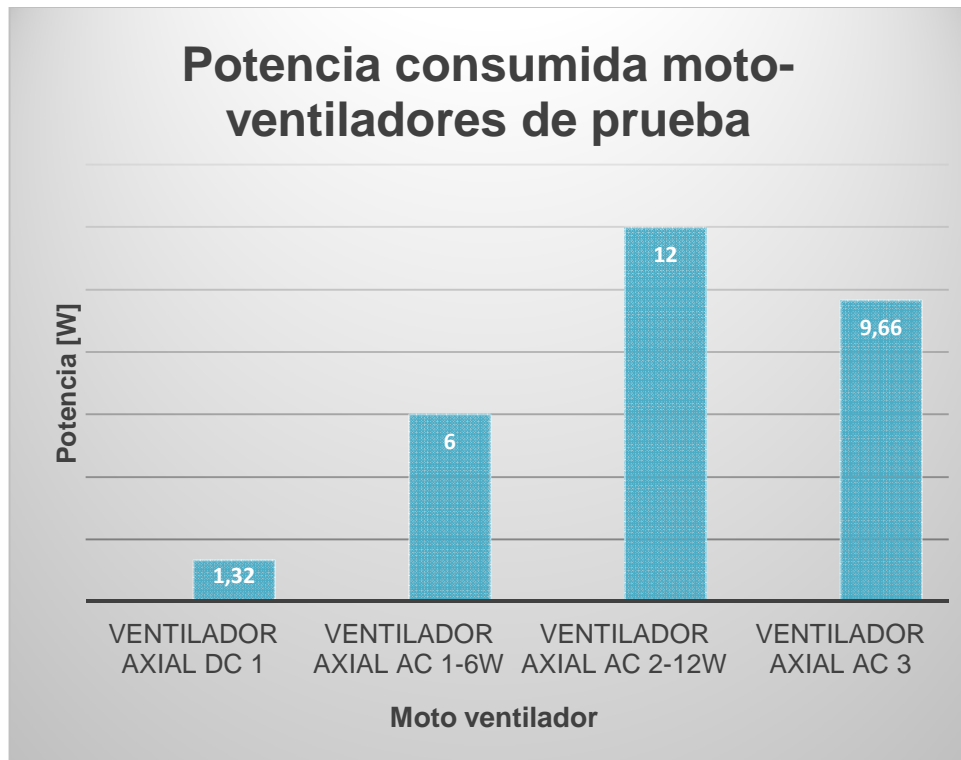
Foto 22. Datos de Placa, Refrigerador De Estudio



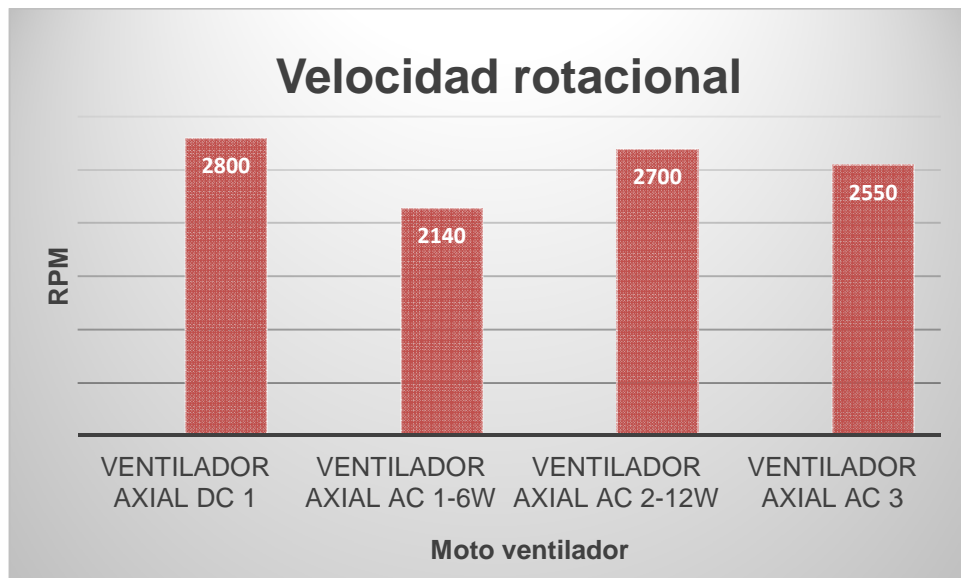
5.6 Análisis para la selección del ventilador.

Se muestra a continuación una serie de graficas comparativas, de las diferentes variables que se tuvieron en cuenta en la evaluación de los ventiladores de prueba y una serie de criterios para la selección de un ventilador al interior de un refrigerador doméstico. Estas comparaciones se realizan a partir de los datos reportados por los fabricantes y obtenidos con el banco de ensayos mini túnel de viento con el fin de mostrar de una forma fácil y rápida el comportamiento de cada ventilador

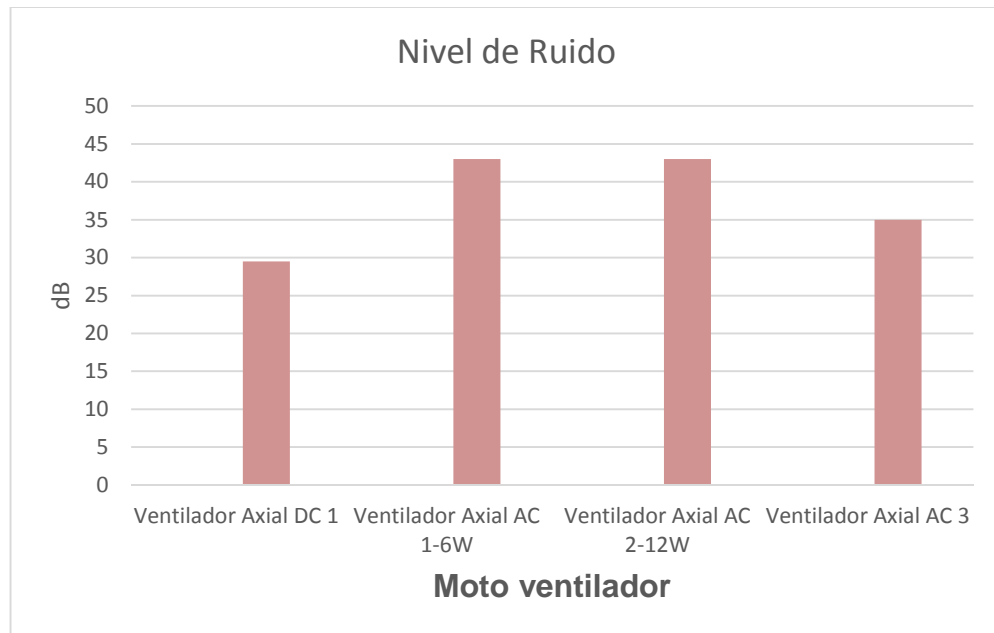
Gráfica 8. Comparación de potencia consumida por los Moto-Ventiladores de prueba



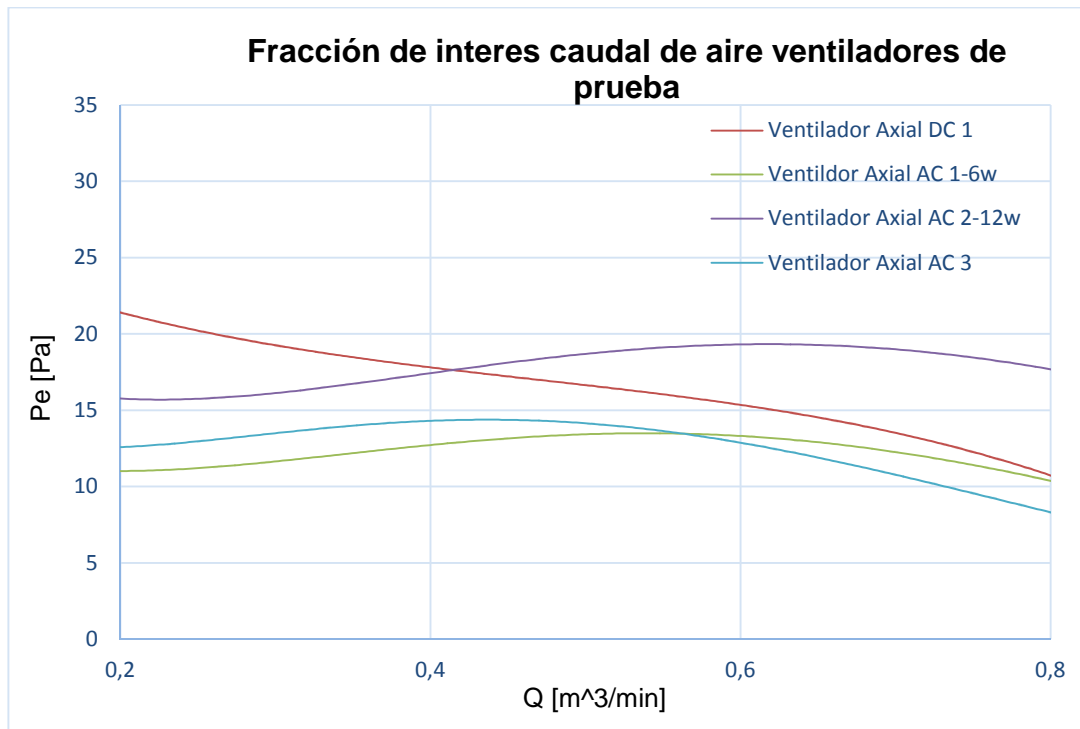
Gráfica 9. Comparación de las RPM por ventilador de prueba



Gráfica 10. Comparación nivel de ruido Por ventilador de prueba, reportada por el fabricante.



Gráfica 11. Fracción de interés caudal de aire Nevera 244L, ventiladores de prueba.



Los ventiladores Axial AC 2-6W y AC 3-12W, junto con el ventilador axial AC 3 generan mayor ruido durante su funcionamiento superior a 35 decibels, además la velocidad rotacional es inferior a la proporcionada por el ventilador Axial DC 1; las hélices de este ventilador alcanza una velocidad rotación promedio de 2800 Rpm, inclusive su diseño aerodinámico en las hélices proporciona una mayor velocidad rotación con solo tres aletas y por consiguiente su nivel de ruido promedio es el más bajo con 29,5 decibels, estableciéndose como el ventilador más silencioso y con menor consumo de potencia.

Cuando nos enfocamos en la carta de comparación de las curvas características de los ventiladores y en especial la porción de curva donde el refrigerador de estudio tiene efecto, vemos que los ventiladores Axial AC 2-12W y Ventilador Axial DC 1 permiten mayor presión estática mientras que los ventiladores Axial AC 1-6W y el ventilador AC 3 proporcionan menor presión estática para el mismo rango de caudal. Sin embargo podemos observar que los ventiladores AC 1-6W y AC 3 tiene un rango de presión estática entre 8 y 15 pascales mientras el ventilador Axial DC tiene un rango más amplio entre 10 y 22 pascales. Siendo el ventilador Axial AC 2-12W el ventilador con un rango más estable de aproximadamente de 16 a 20 pascales máximo.

CONCLUSIONES

El banco de ensayos mini túnel de viento construido y diseñado basado en la norma ANSI-ASHRAE 51-07 permitió la evaluación de ventiladores axiales implementados en los refrigeradores domésticos, identificando para cada uno de ellos el caudal proporcionado según las distintas pérdidas de carga que debe superar en la succión y descarga libre de aire. Además establece a este laboratorio de ensayos como pioneros en la ciudad de Medellín en la elaboración de pruebas para la caracterización, seguimiento y control de calidad del funcionamiento de estos tipos de dispositivos.

El esquema de montaje implementado en el banco de ensayos mini túnel de viento para la medición del caudal de aire a partir de las boquillas de medición tipo Nozzle permite el ensayo de ventiladores axiales, centrífugos y de otros dispositivos de movimiento de aire hasta 144mm de diámetro de descarga con caudales de aire en un rango de 3,83 a 516,14 metros cúbicos por hora.

Los datos obtenidos en el ensayo para los ventiladores Axial AC 1-6W y AC 2-12W con igual número de aspas y el mismo diseño de hélice es congruente con los resultados estimados con la teoría de ventiladores en donde existe un aumento de la presión y el caudal en proporción con la variación de la velocidad rotacional y la potencia del motoventilador, identificable en la curva característica de ambos ventiladores en sus puntos de operación principales como el punto de presión máxima (shutt off) y el punto de descarga de caudal máximo (free delivery).

La comparación entre las curvas experimentales obtenidas con el túnel de viento y la curva característica reportada por el fabricante validó la repetitividad de los ensayos realizados con diferentes túneles de viento y el resultado obtenido con el túnel diseñado. En consecuencia se logra corregir errores de calibración y de cero obtenidos con los equipos de medición, sin embargo se debe tener en cuenta que los resultados deben variar en pequeña proporción dado que la densidad de aire de Medellín, es muy próxima a la densidad de aire estándar, bajo las cuales se realizó el ensayo de la curva característica reportada por el fabricante, por ese motivo debe realizarse un ajuste por densidad.

El ventilador Axial DC, el cual emplea tres aspas y es de corriente directa ofrece mejores características que los demás ventiladores evaluados con el banco de ensayos mini túnel de viento. Posicionándose como uno de los ventiladores con mayor rango de presión estática proporcionada identificable en la curva característica del ventilador. Inclusive su bajo consumo de potencia y nivel de ruido lo perfila como el ventilador de mejor beneficio para la fracción requerida al interior del refrigerador domestico N244L.

Los ventiladores en los refrigeradores domésticos son dispositivos que presenta complejidad al momento de evaluarse. Dentro de los parámetros más relevantes se identifica la curva característica del mismo, debido a que establece la capacidad inherente del ventilador para vencer pérdidas del sistema determinada por la presión estática en función del caudal de aire entregado, lo cual permitió realizar comparaciones entre los diferentes ventiladores de prueba y facilitará la selección de uno de ellos para el sistema de refrigeradores doméstico de acuerdo a su rango de operación y a la caída de presión requerida por el refrigerador.

Implementar protocolos debidamente estructurados para la toma de datos, permitió identificar fácilmente errores y condicionar el funcionamiento del túnel de viento. De esta manera se estableció una serie de guías que capacita e informa a los usuarios del banco de ensayos mini túnel de viento en la realización de pruebas y adquisición de datos en tareas como identificar los instrumentos, componentes y procedimientos para la evaluación de los parámetros principales de los ventiladores.

El desarrollo conceptual y la modelación diseñada mediante un software asistido por computador facilitaron la implementación de diferentes esquemas disponibles para la construcción del túnel de viento bajo la norma referente, además permite proyectar la distribución de equipos, y la asignación correcta de los espacios mínimos requeridos para el aprovechamiento del espacio utilizado en el laboratorio de refrigeración.

El banco de ensayos túnel de viento ofrece una gran cantidad de pruebas y ensayos para la verificación y análisis del funcionamiento de ventiladores axiales, además tiene la capacidad de brindar un laboratorio para estudiantes, profesores y empresas particulares de ingeniería dispuestas en el campo de la ventilación en la evaluación del comportamiento y mejoramiento de la calidad de los ventiladores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. V. DIAZ CORRALES, «Mecánica de Fluidos.,» Universidad Nacional de Ingeniería UNI-Norte, Junio 2009. [En línea]. Available: <http://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/documento-ventiladores-y-compresores-1.doc>. [Último acceso: 24 03 2014].
- [2] R. JORGENSEN, Fan Engineering: an Engineer's handbook on Fans and Their Applications, 8 ed., New York: Buffalo Forge Company, 1982.
- [3] J. DELGADO P, «Conceptos y cambios de aire por hora para la ventilación,» MUNDO HVAC&R, 12 Julio 2012. [En línea]. Available: <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2012/07/conceptos-y-cambios-de-aire-por-hora-para-la-ventilacion/>. [Último acceso: 12 03 2013].
- [4] J. F. CARMONA O, J. A. BOTERO S y S. ARIAS S, Diseño y construcción de un túnel de viento para evaluación de ventiladores axiales domésticos, Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2008.
- [5] E. P. ANDERSON y R. E. PALMQUIST, Refrigeration: Home and Commercial, Indiana: Theodore Audel, 1979.
- [6] C. J. RENEDO, «Sistemas Energeticos Ventiladores,» Universidad De Cantabria, 13 11 2012. [En línea]. Available: [ersonales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Sist%20Ener/04%20Ventiladores.pdf](http://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Sist%20Ener/04%20Ventiladores.pdf). [Último acceso: 24 01 2014].
- [7] C. A. URIBE B, «Notas de clase:Ventiladores, del curso de Fluidos 2, Facultad de Ingeniería Mecánica,» U.P.B, Medellin, 2013.
- [8] CHICAGO BLOWER Argentina, «Clasificacion de los ventiladores industriales,» Chicago blower argentina S.A, 14 03 2013. [En línea]. Available: http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm. [Último acceso: 01 Abril 2013].
- [9] SOLER- PALAU, «Hojas Técnicas, Ventiladores: Curvas Caracteristicas,» S&P Mexico, [En línea]. Available: <http://www.soler-palau.com.mx/ventiladores1.php>. [Último acceso: 02 Abril 2013].

- [10] SODECA, «Informacion Tecnica: Ventilación Basica,» EstudiNord Comunicación, [En línea]. Available: http://www.sodeca.com/img/es/InformacioTecnica_01.pdf. [Último acceso: 02 Abril 2013].
- [11] B. WHITMAN, J. TOMCZYK, B. JOHNSON y E. SILBERSTEIN, «Domestic Refrigerators and Freezers,» de *Refrigeration & Air Conditioning Technology*, Seventh ed., New York, Delmar, 2013, p. 1690.
- [12] BASF Corporation, «Basic Guidelines for plastic conversion of metal axial Flow Fans,» 30 Noviembre 2003. [En línea]. Available: <http://www2.basf.us//PLASTICSWEB/displayanyfile?id=0901a5e180004891>. [Último acceso: 2014 Enero 24].
- [13] D. A. VACA C, «Diseño e implementacion de un modulo didactico de refrigeracion basado en un refrigerador comercial,» Escuela Politecnica Nacional, 12 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4965/1/CD-4504.pdf>. [Último acceso: 05 03 2013].
- [14] J. F. CARMONA O, J. A. BOTERO S y S. ARIAS S, Diseño y construcción de un túnel de viento para evaluación de ventiladores axiales domésticos, Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2008.
- [15] R. Martínez, «Construcción y caracterización de túnel de viento a bajas velocidades, parte I: Aspectos teóricos.,» *Universidad Nacional de Colombia*, pp. 1-2, 2011.
- [16] P. MOONENA, B. BLOCKEN y J. CARMELIETA, «Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel,» *Journal of Wind Engineering*, p. 2, 2007.
- [17] K. Vinayak, S. Niranjan y C. Sandip D, «Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel,» *Journal of Wind Engineering*, pp. 1-2, 2011.

- [18] ISO Standard 5801, 2007, «Acerca de nosotros: iso,» ISO, 2007. [En línea]. Available: <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>. [Último acceso: 29 Octubre 2014].
- [19] ISO.org, «Industrial Fans- Performance Testing Using Standardized Airways,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5801:ed-2:v1:en>. [Último acceso: 19 Julio 2014].
- [20] JIS Standard, JIS B 8330:2000, «Testing methods for turbo-fans,» JIS webstore, 20 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.webstore.jisa.or.jp/webstore/Com/FlowControl.jsp?lang=en&bunsold=JIS+B+8330%3A2000&dantaiCd=JIS&status=1&pageNo=100>. [Último acceso: 22 Septiembre 2014].
- [21] ASHRAE Standard 51, 2007, Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2007.
- [22] Long Wing S&T Co. Ltd, «Amca 210 Series Wind Tunnel Introduction,» 24 Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.longwin.com%2Fdownload%2Fpresentation%2FAMCA-210-07-WT-Introduction-OP-App-20131024.pdf&ei=68--VNaTKMWuggTpt4LYCg&usg=AFQjCNHskIQnAIZ7LbqF>. [Último acceso: 18 Junio 2014].
- [23] G. RECKTENWALD, «A Flow Bench for Measuring Fan Curves and System Curves for Air-Cooled Electronic Equipment,» 20 Abril 2006. [En línea]. Available: <http://web.cecs.pdx.edu/~gerry/epub/pdf/flowBenchManual.pdf>. [Último acceso: 20 Octubre 2014].
- [24] P. J. WALTRICH, «Análise e otimização de evaporadores de fluxo acelerado aplicados a refrigeração domestica,» de *Apendice VI*, Florianópolis, Setembro, M.S. Thesis, Ingeniería Mecánica, Área de ciencias termicas, U.F.S.C, 2008, pp. 185-190.

- [25] C. A. URIBE B, Notas de clase: Ventilación, del curso de Fluidos 2, Facultad de Ingeniería Mecánica, U.P.B: Medellín, 2011.
- [26] C. M. F. K. a. J. G. C.J.L Hermes, «"Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezer vi steady-state-simulation",» *Applied Energy*, vol. 86, nº 7-8, pp. 1311-1319, 2009.
- [27] C. M. C. J. L. H. a. P. J. W. J. R. Barbosa, «"A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin 'no-frost' evaporators",» *Applied Energy*, vol. 86, nº 9, pp. 1484-1491, Septiembre 2009.
- [28] C. J. L. H. J. M. G. a. C. M. M. Waltrich, «"A first-principles simulation model for the thermo-hydraulic performance of fan supplied tube-fin heat exchangers",» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nº 14-15, pp. 2011-2018, Octubre 2010.
- [29] F. T. KNABBEN, «Um estudo in-situ da formação de geada em evaporadores No-Frost,» de *Apendice II*, Florianópolis, SC, M.S. Thesis, Ingeniería Mecánica U.F.S.C, 2010, pp. 115-121.

ANEXOS

ANEXO A. PROCEDIMIENTOS PARA LA ELABORACION DE PRUEBAS

A continuación se presenta los protocolos para la operación y la guía de obtención de datos, diseñados con el fin de capacitar e informar a las personas interesadas en realizar pruebas en el banco de ensayos mini túnel de viento. El usuario tendrá la capacidad de identificar los instrumentos de medición, los componentes del túnel de viento, procedimientos para la manipulación del túnel de viento, procedimientos para la obtención de datos

Tabla A 1. Información general túnel de viento:

Banco de ensayos túnel de viento		
Alto: 1538 mm	Ancho: 403. 2 mm	Profundo: 1564.2 mm
Norma Base	ANSI/ AMCA 210-07. ANSI/ ASHRAE 51-07.	
Tipos de configuración	Configuración 12	Configuración 15
Tipo de instalación	Instalaciones Tipo A y Tipo D	
Caudal máximo	516,14 m ³ /h	
Presión estática	0-50 Pa	
Presión Diferencia	0-625Pa	
Boquillas	Boquillas de medición de caudal entre 0,375 pulgadas a 3.00 pulgadas de diámetro, fabricadas en aluminio.	
Fuente de potencia	AC 220 V	
Ventilador máximo de prueba:	Ventiladores con un diámetro de aspa hasta 114 mm	

PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO TUNEL DE VIENTO:

1. Verificar las piezas estructurales y equipos del banco de ensayo de manera que se pueda disponer de los instrumentos mínimos de medición de acuerdo a la siguiente lista de chequeo:

LISTA DE CHEQUEO FUNCIONAMIENTO TUNEL DE VIENTO

NOMBRE:	Juan Tangarife Tuberquia	FECHA	16/12/2014
TIPO DE ENSAYO	Curva característica ventilador axial	CONFIGURACIÓN TÚNEL DE VIENTO	Configuración 12 tipo A

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	Disponible	
		SI	NO
Soportes túnel de viento	Estructuras y apoyos túnel de viento	X	
Secciones túnel de viento	Componentes del túnel de viento	X	
Gabinete de control	Gabinete con equipos eléctricos para el funcionamiento del túnel de viento	X	
Ventilador auxiliar	Ventilador de velocidad variable, que es controlado desde el software de operación	X	
Discos soporte con boquillas	Instrumentos para la medición de caudal, varían de acuerdo al diámetro de boquilla	X	
Sensores de presión	Instrumentos para la medición de presión, las son presión barométrica, presión estática o diferencial de presión	X	
Medidores de Temperatura	Instrumentos para la medición de temperatura.	X	
Multímetro Digital	Instrumento para la medición de voltaje y corriente del ventilador de prueba	X	
Fuente de energía	Equipo o suministro de energía para el ventilador prueba.	X	
Tacómetro	Instrumento para la medición de la velocidad de giro del ventilador de prueba	X	
Software de operación	Programa diseñado para el control y adquisición de datos del túnel de viento	X	
Conexiones eléctricas	Suministro de energía para el gabinete de control	X	
Conector USB	Cable para conexión del gabinete de control con la computadora	X	
Computador	Equipo para la manipulación del software de control	X	
Ventilador de prueba	Ventilador que se evaluara en el mini banco de ensayos túnel de viento	X	
<p>Observaciones: El tacómetro digital utilizara un trípode para garantizar que el sensor óptico de velocidad siempre enfoque en un mismo el punto de medición. La fuente de energía incluye un medidor de corriente y voltaje.</p>			

2. Identifique el ventilador del evaporador para el ensayo u otro dispositivo de prueba, seguido ensámblelo de acuerdo al tipo de instalación en el soporte del ventilador de prueba de tal modo que solo se permita el flujo de aire a través del área circular de las aspas. Apriete suavemente con las grapas de sujeción rápidas, hasta que esté totalmente concéntrico al área del banco de ensayos mini túnel de viento.
3. Seleccione el tamaño de boquilla o Nozzle de acuerdo al rango de caudales disponible para la medición, inmediatamente sitúelo junto con el anillo de posición dentro de la sección de pruebas, a continuación empalme la sección de prueba a las secciones adyacentes con las perillas de sujeción. Apriete suavemente hasta que no queden aberturas y verifique la posición de los instrumentos sea correcta.
4. Compruebe que los demás elemento se encuentran bien ensamblados y abra las perillas de fijación de los rodachinas del soporte de este modo evita que el túnel este en movimiento.
5. Inicie el programa de control del laboratorio, mediante el software de simulación *LABVIEW®*. verifique que las ganancias respectivas para el funcionamiento del transductor como se indica en la siguiente tabla señal eléctrica y seguido verifique que los indicadores de presión estática y presión diferencial se encuentren aproximadamente en cero.

Tabla 27. Señal Eléctrica, Medidores de Presión

Señal	Presión estática	Presión Diferencial
Corriente	Pa	Pa
4mA	0	0
20mA	50	650

6. Encienda eléctricamente el tablero de control y proceda a la obtención de datos del ensayo desde el panel de control del software.

GUIA PARA LA OBTENCION DE DATOS:

Este procedimiento le facilitara la toma de datos y la presentación ordenada de la información experimental. Es importante tomar registro de las condiciones ambientales de prueba, configuración y tipo de instalación implementada por el túnel de viento en este caso la configuración 12, instalación tipo A y una fotografía del ventilador de ensayo.

Guía toma de datos.

Objetivo:

Realizar la curva característica del ventilador de los refrigeradores domésticos en función de la presión estática (P_e) y Caudal de aire (Q)

Alcance:

Este ensayo de laboratorio tienen como propósito determinar la capacidad característica del ventilador axial para transferir potencia al aire circundante que mueve a una velocidad de giro nominal o variable y de este modo obtener la curva característica dada por las pérdidas de carga representadas por la presión estática y la cantidad de aire que mueve con ayuda del banco de ensayos mini túnel de viento de acuerdo a la norma ANSI/AMCA 210-07, configuración 12 tipo A.

Descripción del Procedimiento de toma de datos¹:

1. Accionar el ventilador de prueba a la velocidad que se requiera, cuando los sensores de medición se encuentre en un valor estable y con el túnel de viento cerrado en su salida, registrar los datos de presión estática (P_e) y diferencial de presión (ΔP), durante 30 segundos, estimar un promedio de ellos y con estos valores se determinará la presión estática máxima o **shutt off** de la curva característica.
2. Con el ventilador de prueba girando a una velocidad nominal, encender el ventilador auxiliar en un porcentaje de accionamiento que va de 0% (apagado) a 100% (Velocidad máxima), hasta que la presión estática sea aproximadamente cero, así se obtiene el punto de máximo caudal, registrar la medición de presión estática (P_e) y diferencial de presión (ΔP) durante 30 segundos, calcular un promedio de los datos registrados y este punto será de máximo caudal o el **free delivery** de la curva característica.
3. Luego reducir el porcentaje de accionamiento del ventilador auxiliar según la cantidad de puntos de operación que se quiera obtener sobre la curva característica, registrando para cada punto la presión estática (P_e) y la diferencial de presión (ΔP) durante 30 segundos y estimar el promedio de ambos datos.
4. Calcular el caudal (Q) a partir de los datos promediados registrados de presión estática (P_e) y presión diferencial (ΔP), además del diámetro de boquilla de medición utilizada (D_5), se deberá anexar las condiciones ambientales de la prueba y llenar el formato de Resultados.

¹ Deberá realizarse después del protocolo de funcionamiento del Túnel de Viento.

Nota: se debe Realizar los pasos 1 al 4 para cada una de las boquillas disponibles en el laboratorio
FORMATO DE RESULTADOS.

1. Caracterización del ventilador de prueba: se registrara los datos técnicos y físicos del ventilador según la siguiente tabla:

Tabla A 2. Formato Registro de datos nominales Ventilador de prueba

MARCA MOTO VENTILADOR		VENTILADOR XXXXX			
		<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> Registro fotográfico: DD/MM/AAAA </div>			
Modelo		Sentido de giro		RPM	
Voltaje [V]		Corriente [A]		Fuente	
Número de aspas		Potencia [W]		dB	
Diámetro de aspa [mm]		Frecuencia [Hz]		Hrs de Func.	
Observaciones:					

2. Condiciones ambientales: Registro de las condiciones climáticas en las cuales se llevó a cabo el ensayo del ventilador en tabla mostrada a continuación:

Tabla A 3. Formato Registro de Datos Atmosféricos

HR [%]		Presión Barométrica [Pa]		Altura m.s.n.m	
Temperatura bulbo seco		Temperatura de bulbo húmedo		Densidad del aire [kg/m3]	

3. Tomar mediciones de presión estática y presión diferencial, por tamaño de boquilla y apertura del ventilador auxiliar. Como se muestra a continuación:

Tabla A 4. Formato Registro de mediciones de presión y caudal por boquilla

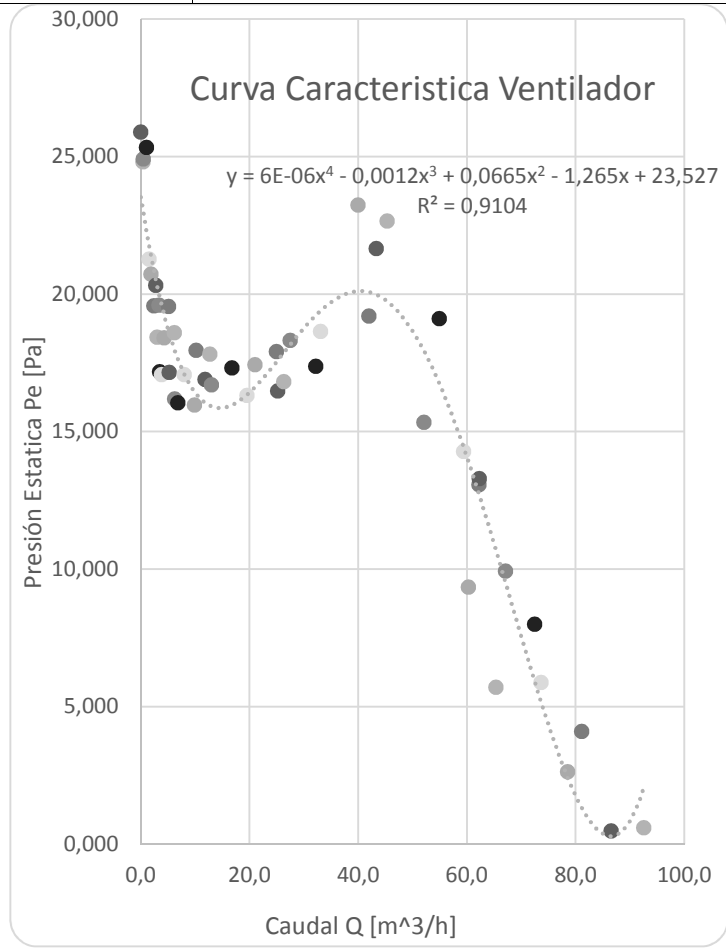
Nozzle 3,000"	P_e [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO					
FD					
1					
2					
3					
4					

4. Hoja de grafica de resultados: la siguiente hoja muestra una tabla con el resumen de la prueba, en donde se muestra la curva del ventilador, la ecuación polinómica que rige el ventilador y el R cuadrado

MARCA MOTO VENTILADOR		XX-XXX					
MODELO	YYY-XXX	SENTIDO DE GIRO		RPM		VOLTAJE [V]	
CORRIENTE [A]	-	POTENCIA [W]		Frecuencia [HZ]		FUENTE	
No. ASPAS		DIÁMETRO ASPA [mm]		dB		Hrs de Func	
Fecha:	DD/MM/AAAA	Altura [m.s.n.m]:		Presión atmosférica [Pa]		HR. [%]	
T bulbo H [°C]		T.amb [°C]		ρ aire[kg/m3]		No. Nozzle	
Laboratorio	U.P.B	Configuración	12	Tipo	A	Norma	Amca 210-07

Realizó: _____ Aprobó: _____

Q [m³/h]	Pe [Pa]
0,000	25,885
0,426	24,805
0,447	24,906
1,030	25,329
1,544	21,264
1,877	20,727
2,417	19,570
2,750	20,311
2,978	18,429
3,329	19,596
3,484	17,177
3,822	17,068
4,290	18,411
5,098	19,542
5,260	17,153
6,167	18,596
6,227	16,189
6,823	16,041
8,012	17,071
9,915	15,969
10,172	17,956
11,859	16,900
12,714	17,809
12,992	16,694
16,778	17,314
19,561	16,314
25,213	16,474
26,317	16,816
32,211	17,369
33,078	18,642
39,993	23,231
41,949	19,195
45,327	22,660
52,094	15,331
54,899	19,107
59,383	14,282
60,261	9,342
62,200	13,070
62,294	13,286
65,337	5,697
67,142	9,929
72,452	7,989
73,622	5,879
78,532	2,635
81,128	4,097
86,528	0,475



Observación: _____

ANEXO B. MEDICIONES CON EL TÚNEL DE VIENTO

Como resultado del ensayo para cada uno de los ventiladores evaluados, en el banco de pruebas mini túnel de viento bajo las condiciones ambientales (descritas en el capítulo 5 de este documento.) se muestra a continuación una serie de tablas en las cuales se encuentran consignadas los datos de las mediciones adquiridas durante el test. Los cuales son necesarias para la obtención de la curva característica de cada ventilador.

Los datos presentados en la tabla B1 a la B7 corresponden a las mediciones para el ventilador Axial AC 1-6W a velocidad nominal.

Tabla B 1. Mediciones boquilla 2.00", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 2,000"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	18,118	-0,502	0,00	0,000	0,000
FD	0,398	48,656	70,79	41,663	61
1	3,092	40,424	64,42	37,915	51
2	6,683	32,174	57,35	33,758	41
3	10,037	24,030	49,44	29,097	31
4	12,842	19,483	44,42	26,147	21
5	18,684	16,720	41,09	24,183	11
6	18,697	16,554	40,88	24,063	0

Tabla B 2. Mediciones boquilla 1.60", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 1,600"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	19,763	-0,031	0,00	0,000	0,000
FD	0,787	90,925	62,00	36,492	100
1	3,731	79,045	57,74	33,987	80
2	8,180	56,666	48,76	28,697	60
3	14,529	40,017	40,84	24,040	40
4	13,065	20,094	28,75	16,924	20
5	10,794	9,330	19,43	11,438	0

Tabla B 3. Mediciones boquilla 1.250", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 1,250"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	17,061	-0,242	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	10,217	106,152	40,76	23,992	100
2	13,143	91,281	37,75	22,220	80
3	14,276	65,211	31,82	18,727	60
4	12,858	39,654	24,70	14,536	40
5	11,182	19,07	17,00	10,006	20
6	12,111	10,616	12,60	7,416	0

Tabla B 4. Mediciones boquilla 1.00", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 1,000"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	17,278	0,533	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	14,388	113,672	26,90	15,835	100
2	13,628	94,556	24,50	14,419	80
3	12,244	64,673	20,19	11,884	60
4	10,801	39,363	15,67	9,226	40
5	11,733	20,560	11,25	6,621	20
6	12,841	12,274	8,64	5,085	0

Tabla B 5. Mediciones boquilla 0.687", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 0,687"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	16,680	0,171	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	11,457	114,263	12,64	7,439	100
2	10,742	93,872	11,43	6,730	80
3	10,700	65,266	9,50	5,591	60
4	11,639	41,030	7,49	4,411	40
5	12,819	22,13	5,47	3,217	20
6	13,604	13,223	4,20	2,472	0

Tabla B 6. Mediciones boquilla 0.500", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 0,500"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	16,165	0,000	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	10,519	114,908	6,67	3,925	100
2	10,695	95,334	6,06	3,569	80
3	11,449	66,374	5,04	2,966	60
4	12,399	42,380	4,01	2,358	40
5	13,243	23,18	2,94	1,732	20
6	14,030	14,123	2,28	1,345	0

Tabla B 7. Mediciones boquilla 0.375", Ventilador Axial AC 1-6W.

Nozzle 0,375"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	16,860	0,00	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	12,233	114,85	3,73	2,193	100
2	12,263	95,91	3,40	2,000	80
3	12,652	67,22	2,83	1,668	60
4	13,518	43,13	2,26	1,329	40
5	14,222	23,69	1,66	0,979	20
6	14,811	14,62	1,30	0,766	0

Los datos obtenidos para el Ventilador Axial AC 2-12W, a velocidad nominal se muestran en la Tabla B8 a la A15 y corresponde a las mediciones hechas para cada boquilla.

Tabla B 8. Mediciones boquilla 3.00", Ventilador Axial AC 2-12W.

Nozzle 3,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	25,885	-0,832		0,000	0,000
FD	0,594	16,536	92,66	54,535	39
1	4,097	12,737	81,13	47,750	29
2	7,989	10,201	72,45	42,644	19
3	13,070	7,563	62,20	36,610	9
4	13,286	7,586	62,29	36,665	0

Tabla B 9. Mediciones boquilla 2.00", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 2,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	25,329	-0,784	0,00	0,000	0,000
FD	0,475	72,273	86,53	50,928	78
1	2,635	59,706	78,53	46,222	68
2	5,879	52,475	73,62	43,332	58
3	9,929	43,866	67,14	39,518	48
4	14,282	34,458	59,38	34,951	38
5	19,107	29,535	54,90	32,312	28
6	19,195	17,414	41,95	24,690	0

Tabla B 10. Mediciones boquilla 1.600", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 1,600"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	24,809	-0,085	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	5,697	100,841	65,34	38,456	100
2	9,342	85,992	60,26	35,468	80
3	15,33	64,566	52,09	30,661	60
4	22,660	49,119	45,33	26,679	40
5	17,369	25,109	32,21	18,959	20

Tabla B 11. Mediciones boquilla 1.250", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 1,250"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	25,000	0,103	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	21,648	119,673	43,31	25,493	100
2	23,231	102,288	39,99	23,539	80
3	18,642	70,409	33,08	19,469	60
4	16,816	44,924	26,32	15,490	40
5	16,314	25,11	19,56	11,513	20

Tabla B 52. Mediciones boquilla 1.00", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 1,000"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	25,062	-0,337	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	18,318	118,518	27,48	16,173	100
2	17,911	98,147	24,97	14,694	80
3	17,432	70,096	21,03	12,381	60
4	17,314	44,984	16,78	9,875	40
5	17,809	26,129	12,71	7,483	20
6	17,956	16,864	10,17	5,987	0

Tabla B 13. Mediciones boquilla 0.687", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 0,687"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	24,906	0,138	0,45	0,263	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	16,694	120,627	12,99	7,647	100
2	16,900	100,841	11,86	6,980	80
3	15,969	70,988	9,91	5,836	60
4	17,071	46,776	8,01	4,716	40
5	18,596	28,03	6,17	3,630	20
6	19,542	19,323	5,10	3,001	0

Tabla B 14. Mediciones boquilla 0.500", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 0,500"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	24,805	0,472	0,43	0,251	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	16,041	120,165	6,82	4,016	100
2	16,189	100,465	6,23	3,665	80
3	17,153	72,194	5,26	3,096	60
4	18,411	48,454	4,29	2,525	40
5	19,596	29,506	3,33	1,959	20
6	20,311	20,307	2,75	1,619	0

Tabla B 15. Mediciones boquilla 0.375", Ventilador Axial AC 2-12W

Nozzle 0,375"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	25,566	0,072	0,11	0,067	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	17,068	120,714	3,82	2,250	100
2	17,177	100,696	3,48	2,050	80
3	18,429	74,083	2,98	1,753	60
4	19,570	49,234	2,42	1,422	40
5	20,727	30,026	1,88	1,105	20
6	21,264	20,480	1,54	0,909	0

La Tabla B16 a la A11 corresponde a las mediciones realizadas discriminada por el tamaño de la boquilla para el ventilador Axial AC 3, a velocidad nominal.

Tabla B 16. Mediciones boquilla 3.00", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 3,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	20,161	-0,386	0,00	0,000	0,000
FD	0,293	53,376	74,14	43,636	61

Tabla B 17. Mediciones boquilla 2.00", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 2,000"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	18,561	-0,308	0,00	0,000	0,000
FD	0,168	43,560	66,92	39,385	57
1	2,617	39,538	63,70	37,491	47
2	5,765	31,846	57,06	33,583	37
3	9,293	23,564	48,95	28,808	27
4	11,896	19,280	44,19	26,008	17
5	17,547	16,430	40,72	23,969	7
6	17,443	16,180	40,41	23,786	0

Tabla B 18. Mediciones boquilla 1.600", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 1,600"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	19,704	0,320	3,49	2,053	0,000
FD	0,433	90,262	61,77	36,359	95,5
1	4,158	72,789	55,38	32,593	75,5
2	8,525	52,143	46,74	27,509	55,5
3	15,95	36,211	38,82	22,847	35,5
4	14,450	20,896	29,33	17,265	15,5
5	12,973	12,459	22,53	13,260	0

Tabla B 19. Mediciones boquilla 1.250", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 1,250"					
Ensayo	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
SO	19,785	0,181	1,61	0,950	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	9,832	106,263	41,09	24,183	100
2	11,068	88,944	37,26	21,930	80
3	18,520	69,151	32,78	19,293	60
4	14,715	42,107	25,46	14,987	40
5	13,461	21,82	18,21	10,716	20
6	13,819	13,315	14,15	8,327	0

Tabla B 20. Mediciones boquilla 1.00", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 1,000"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	19,331	-0,138	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	18,237	118,912	27,52	16,201	100
2	15,096	96,796	24,79	14,592	80
3	13,817	68,342	20,77	12,223	60
4	13,069	41,801	16,16	9,513	40
5	12,372	43,960	16,57	9,754	20
6	14,440	14,180	9,30	5,475	0

Tabla B 21. Mediciones boquilla 0.687", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 0,687"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	18,831	-0,313	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	13,178	116,276	12,75	7,506	100
2	12,816	96,220	11,58	6,815	80
3	12,718	68,300	9,72	5,722	60
4	13,211	42,656	7,64	4,499	40
5	14,402	22,77	5,55	3,264	20
6	15,092	14,916	4,47	2,629	0

Tabla B 22. Mediciones boquilla 0.500", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 0,500"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	18,780	-0,606	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	12,697	116,960	6,73	3,961	100
2	12,951	97,142	6,12	3,603	80
3	13,364	69,473	5,16	3,036	60
4	14,193	44,146	4,09	2,408	40
5	15,367	25,029	3,06	1,801	20
6	15,854	15,623	2,41	1,416	0

Tabla B 23. Mediciones boquilla 0.375", Ventilador Axial AC 3

Nozzle 0,375"	Pe [Pa]	ΔP [Pa]	Q [m³/h]	Q [CFM]	Ventilador Aux. [%]
Ensayo					
SO	19,074	-0,49	0,00	0,000	0,000
FD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	13,017	116,20	3,75	2,206	100
2	13,049	97,33	3,42	2,015	80
3	13,812	69,67	2,89	1,699	60
4	14,878	44,59	2,30	1,352	40
5	15,477	25,11	1,71	1,008	20
6	16,148	15,84	1,36	0,798	0

ANEXO C. ITERACIÓN PARA CALCULO NÚMERO DE REYNOLDS.

Para calcular el valor del número de Reynolds se debe usar una estimación del coeficiente de descarga C del Nozzle, con este nuevo valor de Re se utiliza para recalcular un nuevo coeficiente de descarga, así sucesivamente hasta que la diferencia entre dos valores del coeficiente de descarga tenga una buena precisión. Estos valores son usados en el capítulo 4, sección 4.5.5 de este documento para calcular el caudal de aire a través del Nozzle.

A continuación se describe el procedimiento a seguir:

PASO 1.

Calcular el Re usando la siguiente ecuación, suponiendo un valor del coeficiente de descarga (se sugiere que el valor estimado de $C_{e1}=0.99$), de modo que

$$Re = \frac{\sqrt{2}}{\mu} C_e D_6 Y \sqrt{\frac{\Delta P \rho_x}{1-E\beta^4}} \text{ Eq. C.1}$$

PASO 2.

Calcular el valor Coeficiente de descarga C_e , usando el valor de Re, para una relación de la geometría del Nozzle de $L/D= 0.6$ con la siguiente ecuación

$$C_{e2} = 0.9986 - \left(\frac{6.688}{\sqrt{Re}}\right) + \left(\frac{131.5}{Re}\right) \text{ Eq. C.2}$$

PASO 3.

Estimar la diferencia entre los coeficientes de descarga, de modo que esta se igual o menor que la tolerancia esperada.

$$|C_{e1} - C_{e2}| \leq Tol \text{ Eq. C.3}$$

PASO 4.

Si la diferencia entre los coeficientes descarga es mayor a la tolerancia permitida, se recalcula el nuevo valor de Re a partir del C_{e2} . Y se repiten los pasos 2-3.

$$Re_2 = Re_1 \left(\frac{C_{e2}}{C_{e1}}\right) \text{ Eq. C.4}$$

Usualmente este procedimiento converge rápidamente, si por alguna razón inusual el proceso de iteración no converge, entonces intente utilizando una condición inicial C_{e1} Diferente.

ANEXO D. CONVERSIÓN A OTRAS DENSIDADES Y VELOCIDADES DE ROTACIÓN

Cuando en el aire existe grande cambios en la densidad, es necesario tratar el aire como un gas comprensible, y se puede convertir los resultados de las pruebas obtenidas a una nueva velocidad de rotación usando las siguientes formulaciones matemáticas y un proceso de iteración descritos a continuación.

PASO 1.

Con la información obtenida en el banco de ensayos túnel utilizar las ecuaciones 23, 24 y 25 para hallar el K_p ,

PASO 2.

Suponer $K_p = K_{pc}$, Junto con las nuevas condiciones de velocidad rotacional (N_c) y densidad de aire (ρ_c) en las siguientes ecuaciones.

$$Q_c = Q \left(\frac{N_c}{N} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \text{ Eq. D.1}$$

$$P_{tc} = P_t \left(\frac{N_c}{N} \right)^2 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \text{ Eq. D.2}$$

$$P_{vc} = P_v \left(\frac{N_c}{N} \right)^2 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \text{ Eq. D.3}$$

$$P_{sc} = P_{tc} - P_{vc} \text{ Eq. D.4}$$

$$H_c = H \left(\frac{N_c}{N} \right)^3 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \text{ Eq. D.5}$$

$$\eta_{tc} = \eta_t \text{ Eq. D.6}$$

$$\eta_{sc} = \eta_t \left(\frac{P_{sc}}{P_{tc}} \right) \text{ Eq. D.7}$$

PASO 3.

Con los nuevos valores de caudal (Q_c), presión total (P_{tc}) y potencia (H_c) utilizar las ecuaciones 23, 24 y 25 encontrar el nuevo valor de K_{pc}

PASO 4.

Con el nuevo valor de K_{pc} , junto con Junto con las condiciones de velocidad rotacional (N_c) y densidad de aire (ρ_c) en las ecuaciones D.1, D.2, D.3, D.4, D.5, D.6 y D.7, encontrar los nuevos Q_c , P_{tc} , y H_c de la siguiente iteración, repetir el proceso hasta obtener la suficiente precisión que se requiera.

ANEXO E. FICHA TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS MEDICIÓN

1. **Manómetros.** se utilizó un sensor de presión LP 1000 series GE DRUCK
 Figura 31. Sensor LP 1000 GE DRUCK, Catalogo comercial.

STANDARD SPECIFICATIONS		CALIBRATION STANDARDS	
Output Signal (Uni-directional) LPM: 0 - 2.5Vd.c. (2-wire) 0 - 10Vd.c. (2-wire) 3 - 10Vd.c. (2-wire) 0 - 10Vd.c. (3-wire) LPI: 4 - 20mA (2-wire)		INSTRUMENTS MANUFACTURED BY DRUCK LIMITED ARE CALIBRATED AGAINST PRECISION CALIBRATION EQUIPMENT TRACEABLE TO INTERNATIONAL STANDARDS	
Output Signal (Bi-directional) LPM: 2.5Vd.c. 2.5Vd.c. (3-wire) 10Vd.c. 10Vd.c. (3-wire) LPI: 12mA 8mA (2-wire)		ORDERING INFORMATION LP 1000 without LCD (1) Select model number:	
Supply Voltage Without LCD: 10 - 30Vd.c. With standard LCD: 15 - 30 Vd.c. With LCD and LED: 20 - 30 Vd.c. With LCD and square root extractor: 10 - 30 Vd.c. Note: minimum 15 Vd.c. supply for 0 - 10Vdc output		Code: Output LPM Voltage LPI Current	
Load Impedance LPM 1000: 5kΩ minimum LPI 1000: 10kΩ - 10Vd.c.		Code: Pressure Range 10 Range from 0.25bar to 2.5bar 15 Range from 5bar to 15bar 20 Range from 20bar to 70bar	
Damping of output signal User accessible from 10msec to 2 sec		Code: Configuration 0 Gauge 1 Differential Code: Pressure Connection 0 10 - 22 UNF Female to 1/8" barbed fitting 1 MS Female 2 MS Female to 9mm barbed fitting	
Performance Accuracy Combined Non-linearity, Hysteresis and Repeatability: 0.1% of calibrated range (maximum). Optional 0.25%		Code: Electrical Connection -C1 DIN A connector -C2 Screw terminal -C3 DIN C connector Code: Special Features -S Standard -L Square Root extractor (only LPI)	
Operating Temperature Range 0°C to 50°C		Code: Special Features -S Standard -L Square Root extractor (only LPI)	
Temperature Effects Over the range of 0°C to 50°C: Range 0.25bar to 2.5bar: 0.02bar Range 5bar to 2.5bar: 0.04bar Range 5bar to 7.5bar: 0.12bar Range 10bar to 15bar: 0.25bar Range 20bar to 35bar: 0.5bar Range 40bar to 70bar: 1.0bar		Code: Electrical Connection -C1 DIN A connector -C2 Screw terminal -C3 DIN C connector Code: Special Features -S Standard -L Square Root extractor (only LPI)	
Long Term Stability All standard reference conditions the calibration will not change by more than 1% of calibrated range, averaged over 1 year.		Code: Special Features -S Standard -L Square Root extractor (only LPI)	
Mounting Position Effect No effect on span. Possible zero shift, up to a maximum of 0.2 mbar/KPa change in orientation, correctable by potentiometer adjustment. Note: Factory adjusted with discharge oriented in the vertical plane.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Supply Sensitivity 0.001% Span/ Volt maximum.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Insulation Resistance > 100 MΩ at 50Vd.c.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Humidity 0 - 100% RH, non-condensing.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Physical Pressure Connections 1/20 UNF Female, MS Female or 4mm ID tube connector.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Electrical Connection DIN 43652A standard (except on DC model) Optional screw terminal (standard on DC model) Optional DIN C.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Environmental Protection Sealed to IP54 (except screw terminal).		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
CE Conformity CE marked for EMC and EMI compliance.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	
Weight 400g - 300g approx., dependent upon configuration.		Code: Options -DA LCD Indicator - Aluminum Case -DG LCD Indicator - Stainless Steel Case -DW LCD Indicator - Wall Mount bracket -DC LCD Indicator - Front panel mount and in situ calibration	

Fuente: *Pressure Transmitters LP 1000 Series, low pressure and gauge sensors* en http://veronics.com/products/pressure_transmitters/lp1000.pdf. Consultado el 01 Abril 2014.

2. **VELOCIDAD ROTACIONAL.** se implementó un tacómetro con sensor de velocidad rotacional óptico marca testo 470.

Tabla D 6. Datos de Placa, Tacómetro Marca Testo 470.

VARIABLE	Velocidad rotacional		
FABRICANTE	TESTO		
MODELO	470		
RANGO	1 A 99999 rpm		
RESOLUCIÓN	0.1 rpm (+100... +999.9 rpm)		
EXACTITUD	+/-0.02%		
SERIAL No	021357		
Revisó	JTANGARIFE	Aprobó	CISAZA

Figura 32. Tacómetro TESTO 470, manual de operación.

testo 470

Set testo 470, tacómetro que incluye SoftCase en el maletín de transporte, adaptador, sonda, ruidas giratorias de 0.1 m y 8°, cintas reflectantes, pilas y protocolo de calibración

Modelo 0563 0470



Datos técnicos generales

Temperatura de servicio	0 ... +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +70 °C
Tipo de pila	2 pilas mignon AA
Duración de las pilas	40 h
Pantalla	indicador LCD de 5 dígitos, de una línea
Medidas	175 x 60 x 28 mm
Peso	190 g
Garantía	2 años

Tipos de sensor

	óptico, con haz de luz modulado
Rango de medición	+1 ... +99999 rpm
Exactitud ±1 dígito	±0.02 % del v.m
Resolución	0.01 rpm (+1 ... +99.99 rpm) 0.1 rpm (+100 ... +999.9 rpm) 1 rpm (+1000 ... +99999 rpm)
	mecánico
Rango de medición	+0.1 ... +19999 rpm
Exactitud ±1 dígito	±0.02 % del v.m

	0.1 m	8°	12°
m/min	0.10-1999	0.10-1524	0.40-600.0
ft/min	0.40-6550	0.40-5000	0.40-2000
in/min	4.00-78700	4.00-60000	4.00-24000
m/seg	0.10-33.33	0.10-25.40	0.10-10.16
ft/seg	0.10-109	0.10-83.33	0.10-33.33
m	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999
ft	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999
in	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999

Unidades rpm, m/min, ft/min, in/min, m, ft, in

La tolerancia mecánica en mediciones con un disco de velocidad es de 0.2 %; la exactitud de medición depende de la manipulación, como por ejemplo, presión de contacto, ángulo, etc.

Fuente: Testo 479 en <http://www.meterdigital.com/content/protek-df1731sb3a-dual-output-power-supply-30v-3a>. Consultado el 01 Abril 2014.

3. **VOLTAJE.** Se implementó una fuente de corriente Proteck para la alimentación eléctrica de los moto ventiladores de corriente directa

Tabla D 2. Datos de Placa, Fuente de energía Marca PROTECK.

VARIABLE	Voltaje y Corriente		
FABRICANTE	PROTECK		
MODELO	DF1731SB3A		
RANGO	0-30 Vdc	0-3 A	
RESOLUCION	0.1V	0.01A	
SUPPLY	110 v		
Revisó	JTANGARIFE	Aprobó	CISAZA

Figura 33. Fuente Potencia Proteck.



Fuente: *Proteck DF1731SB3A Dual Output Power Supply 30V-3^a* en <http://www.meterdigital.com/content/protek-df1731sb3a-dual-output-power-supply-30v-3a>. Consultado el 01 Abril 2014.

4. **TEMPERATURA.** El túnel de viento cuenta con un termopar tipo punzón grado T marca TERMOCUPLAS S.A, protegido por un termo pozo recto.

Tipo	Material		Código color		Encapuchado		Rango (°C)		
	Grado termopar	Hilo (+)	Hilo (-)	Hilo (+)	Hilo (-)	Extensión	Encapuchado	Min	Max
T	Cobre	Constatan	Azul	Rojo	Azul	Café	-200	350	
Registro No					99749				
Revisó					Juan Antonio Tangarife				

Figura 34. Termopar tipo punzón, grado T.



Fuente: Termopar y RDT's, termopar tipo punzón, TC en <http://termocuplas.com.co/web/product/termocupla-tipo-punzon/> Consultado el 01 Abril 2014.

5. **VENTILADOR AUXILIAR.** Se implementó como el ventilador auxiliar del túnel de viento marca ebm-Papst modelo W1G200-HH77-52, el cual es ventilador axial serie S, con un sentido de giro en contra de las manecillas del reloj (CCW), el cual puede variar su caudal de aire mediante el control del voltaje 0-10 VDC, con un grado de protección IP 42, protección del motor por auto-bloqueo.

Figura 35. Ventilador Auxiliar Ebm-Papst, datos nominales.



ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG

Bachmühle 2 - D-74673 Mulfingen

Phone +49 7938 81-0

Fax +49 7938 81-110

info1@de.ebmpapst.com

www.ebmpapst.com

Limited partnership - Headquarters Mulfingen

County court Stuttgart - HRA 590344

General partner Elektrobau Mulfingen GmbH - Headquarters Mulfingen

County court Stuttgart - HRB 590142

Nominal data

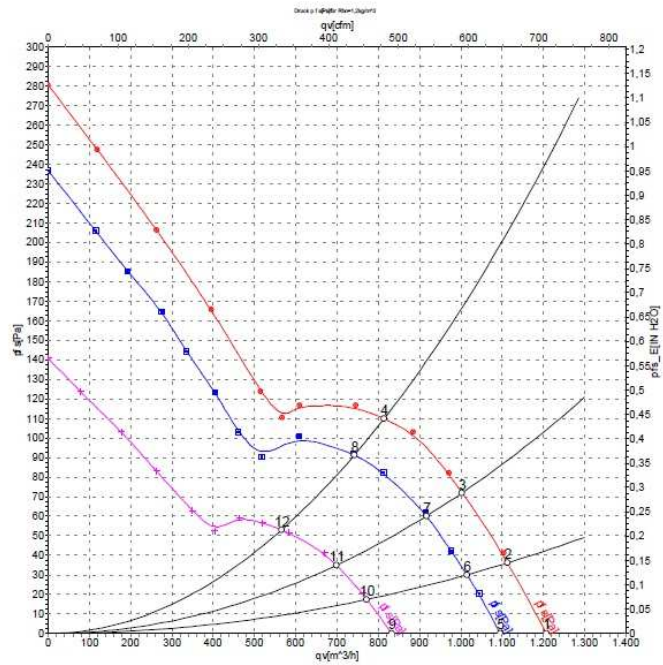
Type	W1G200-HH77-52	
Motor	M1G074-BF	
Nominal voltage	VDC	24
Nominal voltage range	VDC	16 ... 28
Type of data definition	fa	
Speed	min ⁻¹	2950
Power input	W	55
Current draw	A	2.6
Max. back pressure	Pa	120
Min. ambient temperature	°C	-25
Max. ambient temperature	°C	+60

ml = max. load - me = max. efficiency - fs = running at free air - cs = customer specs - cu = customer unit
Subject to alterations

Fuente: *EC AXIAL COMPACT FAN, sickled blades (series S)* en <http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/EC-axial-fan-W1G200HH7752-ENG.pdf>. Consultado el 01 Abril 2014.

Con un diámetro de 200mm, 2.13 kilogramos de peso y nueve hélices puede proporcionar un caudal de aire hasta 565 m³/h y una presión estática de 53 Pa. Estos valores fueron medidos bajo la norma ISO 5801, instalación categoría A.

Figura 36. Curva Característica Ventilador Auxiliar.



Fuente: *EC AXIAL COMPACT FAN, sickled blades (series S)* en <http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/EC-axial-fan-W1G200HH7752-ENG.pdf>. Consultado el 01 Abril 2014.

6. **VENTILADOR NMB Eminebea.** Se implementó como ventilador de prueba y referencia para la verificación del funcionamiento del túnel de viento, el moto ventilador marca Eminebea modelo 09232JH-12L-BA, el cual es ventilador axial, con un sentido de giro en dirección de las manecillas del reloj (CW), de corriente directa y con una expectativa de vida de 70,000 horas, protección del rotor por auto-bloqueo.

Figura 37. Ventilador de Prueba NMB eminebea, Ficha Tecnica

09232JH (旧 3612JL-G) 92[□]X32^L

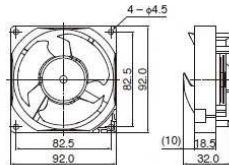
DC Axial Fan



■ 一般仕様 General Specifications

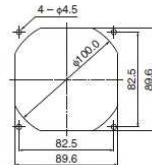
モーター保護 : ロック保護
 Motor Protection : Locked Rotor Protection
 絶縁抵抗 : DC500V メガにて10MΩ以上
 Insulation Resistance : 10MΩ or over with a DC500V Megger
 絶縁耐圧 : AC600V 1s
 Dielectric Withstand Voltage : AC600V 1s
 許容環境温度範囲 : -40°C ~ +40°C (Operating)
 Allowable Ambient : -40°C ~ +70°C (Storage)
 Temperature Range : 実用上とすつかない湿度で結露無きこと
 non-condensing environment

■ 外観図 Outline

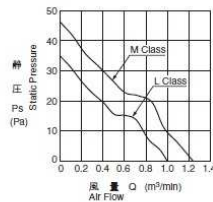


■ 期待できる寿命 ※故障率10% (L10 Life)
 Expected Life ※ Failure Rate: 10% (L10 Life)
 ~20°C 70,000時間 (Hours)

■ 取付穴参考図 Panel Out-cuts



■ 特性曲線 Characteristic Curves



■ 材質 Material

ケーシング : プラスチック(ブラック) UL94V-0
 インペラー : プラスチック(ブラック) UL94V-0
 軸受 : スリーブベアリング
 リード線 : UL1007 AWG26 +: 赤 - : 黒
 Casing : Plastic (Black) UL94V-0
 Impeller : Plastic (Black) UL94V-0
 Bearing : Sleeve Bearing
 Lead Wire : UL1007 AWG26 +: Red, -: Black

■ 仕様 Specifications

型式 Model	管理番号 Product No.	定格電圧 Rating Voltage (V)	使用電圧範囲 Operating Voltage (V)	定格電流 Current (A)**	定格入力 Input Power (W)**	定格回転速度 Speed (min ⁻¹ *)	最大風量 Max. Air Flow (m ³ /min)** (CFM)**	最大静圧 Max. Static Pressure (Pa)** (In H ₂ O)**	騒音 Noise (dB)**	質量 Mass (g)	
09232JH-12L-BA	FD	12	7.0~13.0	0.11	1.32	2800	1.00	35.3	35.0	0.14	29.5
09232JH-12M-BA	FD			0.21	2.52	3350	1.24	43.8	46.3	0.19	34.0

回転方向 : ラベルから見て時計方向
 Rotation: Clockwise as seen from the label side
 風吹き出し方向 : ラベル側
 Airflow Outlets: Label side

*1: Average Values in Free Air

Fuente: *DC AXIAL FAN 09232JH, Eminebea* en <http://www.eminebea.com/jp/product/airmover/data/09232jh.pdf>. Consultado el 01 Abril 2014.

7. BAROMETRO PCE-THB 38. Detecta digitalmente la humedad relativa y la presión barométrica. Con un equipo 3 en uno , mide la presión atmosférica en una escala de 10- 1100 hPa, y la humedad relativa con un sensor capacitivo.

Variable	Tipo	Min	Max	Resolución
Presión Atmosférica.	PCE-THB 38	10hPa	1100 hPa	1hPa
Humedad Relativa	PCE-THB 38	10	95	0,1
Revisó		Juan Antonio Tangarife.		

Figura 38. Termometro, Higrometro y barometro PCE-THB-38



Fuente: Instrucciones de uso Termómetro, Higrómetro, barómetro. PCE-THB-38 en <http://www.pce-iberica.es/manuales/manual-barometro-pce-thb38.pdf>, consultado el 30 Agosto 2014

ANEXO F. FICHA TECNICA MOTO VENTILADORES POR REFRIGERADOR.

La siguiente información tiene como objetivo ofrecer una referencia de los moto ventiladores utilizados según el volumen bruto del refrigerador

Volumen del Refrigerador	Voltaje (V)	Potencia (W)	Rpm	Diámetro de Aspa
Neveras de 244L a 300L	115-220	14	2950	97,8 mm, 4 aspas
Neveras de 220 a 420 L	115-220	14	2700	114 mm, 5 aspas
Neveras de 305 a 345	115-220	12	2550	90 mm, 4 aspas

ANEXO G. MANUAL DE SEGURIDAD.

La siguiente información tiene como objetivo advertir al usuario de los riesgos posibles antes y durante el uso del túnel de viento, siga cuidadosamente las instrucciones.

Existe diferentes tipos riesgo de daño físico como:

1. Voltaje eléctrico: las terminales y conexiones eléctricas pueden tener voltaje incluso con los ventiladores apagados. **ADVERTENCIA** existe el riesgo de descarga eléctrica, revise el equipamiento eléctrico y espere al menos dos minutos después de desconectar la tensión antes de abrir la caja de control u otros dispositivos eléctricos y asegúrese que el cable de alimentación sea lo último que conecte. **EVITE** realizar conexiones eléctricas externas temporales o improvisadas que expongan partes eléctricas sin recubrimiento.
2. Movimiento mecánico: dispositivos en rotación, **PELIGRO** puede existir contacto con las partes móviles como las hélices del ventilador auxiliar y las aspas del ventilador de prueba, Las cuales pueden funcionar aun sin conexión eléctrica y pueden ocasionar que algunas partes del cuerpo sufran heridas o lesiones graves. Antes de trabajar en los ventiladores espere hasta que todas las partes lleguen a un punto muerto y durante el arranque no exista contacto físico de personas u objetos con los aspas de los ventiladores.
3. Ingreso de partículas o gases: se deberá tener **PRECAUCIÓN** con el ingreso de partículas o gases nocivos que puedan ser desplazados por los ventiladores o causar reacciones exotérmicas indebidas.

Estas advertencias indican diferentes situaciones potencialmente peligrosas que si no se evitan pueden causar serias lecciones o incluso la muerte, además puede involucrar daños a partes o equipos del túnel de viento.

Si tiene dudas sobre el funcionamiento de algún instrumento revise el manual de operación del mismo. Tenga mucho cuidado durante el trabajo con el banco de ensayos mini túnel de viento.

ANEXO H. PLANOS DE ENSAMBLE BANCO DE ENSAYOS TUNEL DE VIENTO

Figura 39. Plano de Ensamble

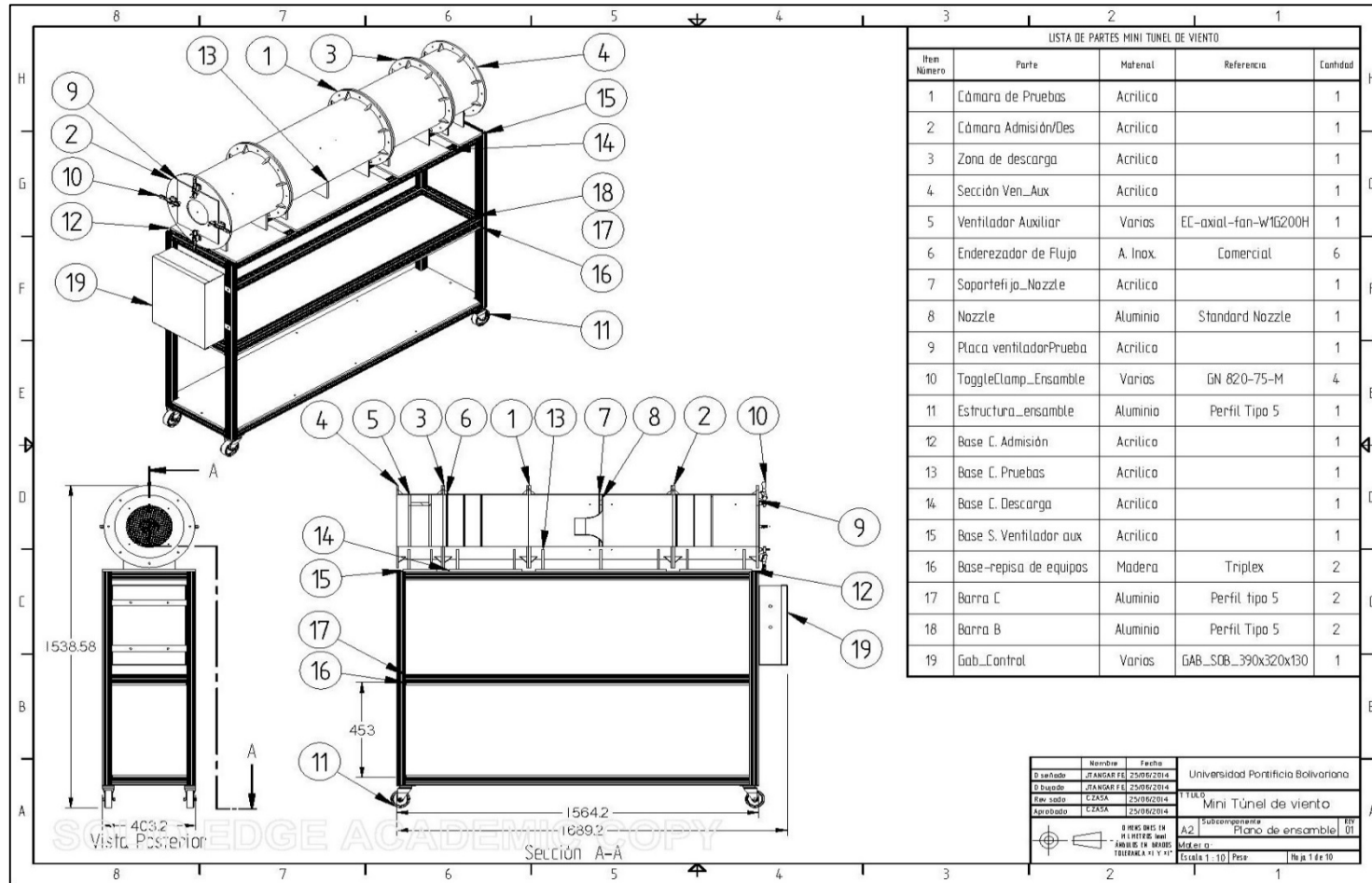


Figura 40. Enderezador de flujo ensamble.

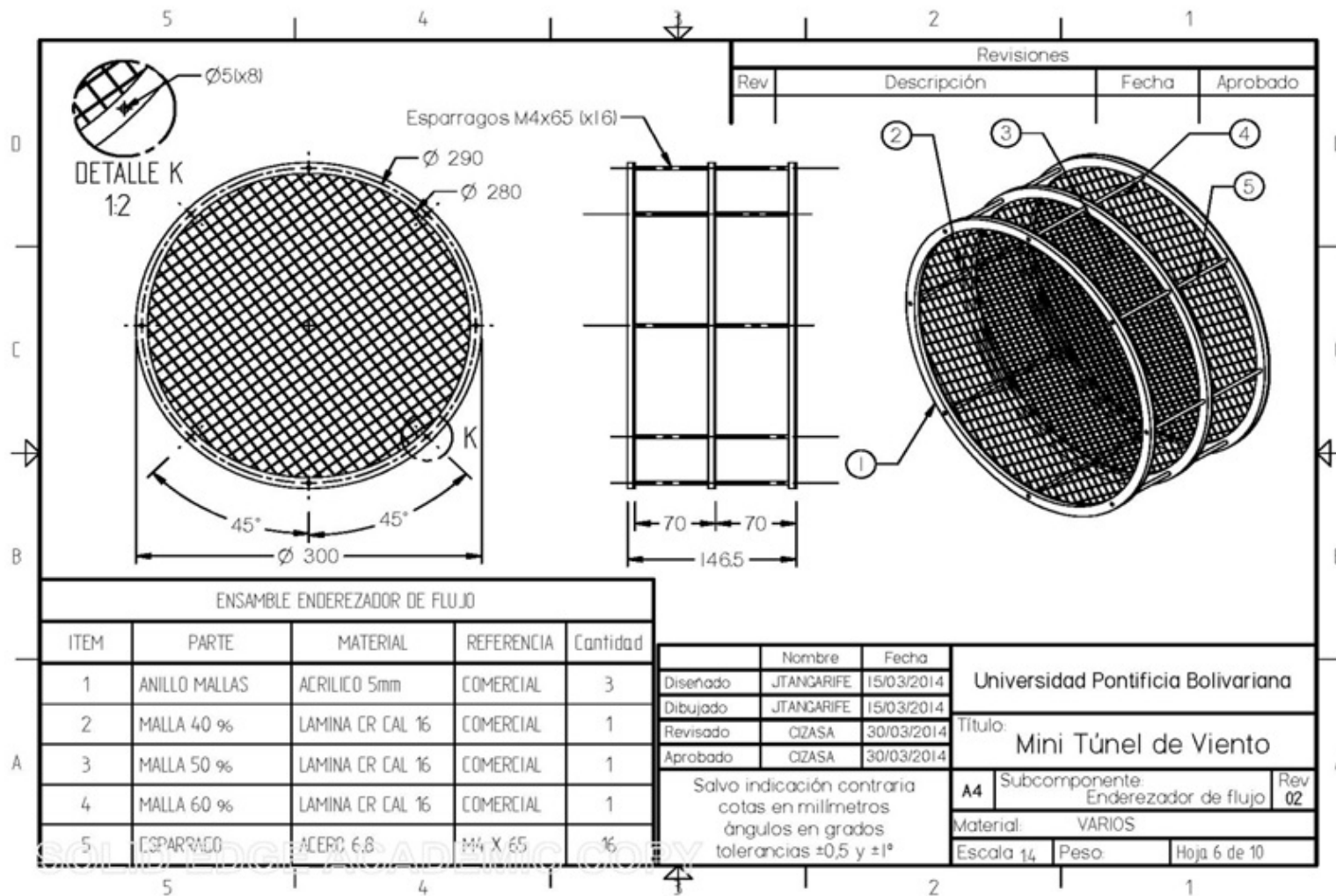


Figura 41. Estructura túnel de viento, ensamble.

