

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE VENTILADOR AXIAL
PARA LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

JOSÉ FEDERICO HERNÁNDEZ ROJAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
TUNJA
2020

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE VENTILADOR AXIAL
PARA LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

JOSÉ FEDERICO HERNÁNDEZ ROJAS

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Directores

Phd. Yina Faizully Quintero Gamboa

MSc. Leonardo Cely Guezguan

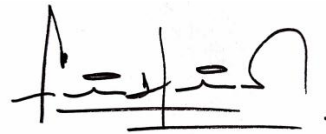
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

TUNJA

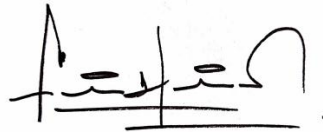
2020

Nota de aceptación:

El trabajo de grado titulado “Diseño y construcción de un banco didáctico de pruebas de ventilador axial para los laboratorios de la USTA Tunja” realizado por el estudiante José Federico Hernández Rojas cumple con los requisitos para optar por el título de Ingeniero Mecánico.



Firma del presidente del jurado



Firma del jurado



Firma del jurado

Tunja, 22/10/20

Dedicatoria

A cada una de las personas que apoyaron incansablemente este proyecto

A las personas que me acompaña y a aquellos que ya no están

A los docentes, los gestores de un mejor mañana

A Colombia, mi patria y Tunja, mi ciudad

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermanos quienes me presentaron el mundo de la educación, motivaron mi interés por el aprendizaje y con su apoyo, fue posible culminar la formación profesional planteada.

A cada uno de mis familiares y amigos quienes a lo largo del proceso de formación me apoyaron y acompañaron.

A la Universidad Santo Tomás seccional Tunja por su contribución a la educación en Colombia

A cada uno de mis docentes de la facultad de Ingeniería Mecánica y el área de humanidades, quienes con su esfuerzo y entrega contribuyeron a la formación profesional brindada.

CONTENIDO

	Pág.
NOMENCLATURA	13
GLOSARIO.....	14
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO REFERENCIAL.....	20
1.1 ANTECEDENTES	20
1.2 MARCO TEÓRICO.....	22
1.2.1 Turbomáquina	22
1.2.2 Ventilador axial.....	25
1.2.3 Laboratorios de ensayo de ventiladores.....	28
1.2.4 Pruebas de ventilador bajo AMCA	28
1.2.5 Banco de pruebas de ventilador axial bajo la norma AMCA 210.....	29
1.2.6 Curvas características	36
1.3 MARCO CONCEPTUAL	38
1.3.1 Instalación.....	38
1.3.2 Configuración de prueba y equipo.....	39
1.3.3 Componentes del banco de prueba de ventilador axial.....	39
2.METODOLOGÍA.....	46
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	47
3.1 SELECCIÓN DEL VENTILADOR.....	47
3.2 SELECCIÓN TIPO DE INSTALACIÓN.....	48
3.3 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE PRUEBA	49

3.4 DIMENSIÓN DEL BANCO Y SUS COMPONENTES.....	51
3.4.1 Componentes del banco.....	55
3.5 SELECCIONAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	66
3.5.1 Manómetro diferencial de columna líquida	66
3.5.2 Tubo de Pitot.....	67
3.5.3 Medición de velocidad de rotación	71
3.6 DIMENSIONAMIENTO DEL SOPORTE ESTRUCTURAL.....	71
3.6.1 Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas.....	71
3.6.2 Soporte estructural del banco de pruebas.....	74
4. RESULTADOS	77
5. CONCLUSIONES.....	91
6. RECOMENDACIONES	93
7. BIBLIOGRAFÍA	95
8. ANEXOS	97

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Turbomáquina	23
Figura 2. Clasificación de los rodetes según la dirección del flujo.....	24
Figura 3. Componentes del ventilador axial	26
Figura 4. Aplicaciones comunes de los ventiladores axiales.....	27
Figura 5. Banco de pruebas de ventilador axial más grande del mundo.....	29
Figura 6. Flujo de un fluido a través de diferentes secciones.....	31
Figura 7. Energía total de un elemento de fluido.....	33
Figura 8. Flujo de un fluido a través de un conducto.....	34
Figura 9. Procedimiento para medir las variables de flujo.....	36
Figura 10. Curva característica de un ventilador axial.....	38
Figura 11. Tipo de instalación de prueba	39
Figura 12. Manómetro diferencial de columna líquida.....	40
Figura 13. Ducto.....	41
Figura 14. Partes de un tubo de Pitot.....	43
Figura 15. Tobera.....	44
Figura 16. Dispositivo de estrangulamiento de flujo.....	45
Figura 17. Ventilador de 120 mm.....	47
Figura 18. Tipo de instalación B seleccionada.....	48
Figura 19. Diseño propuesto por la norma AMCA 210.....	49
Figura 20. Simplificación diseño propuesto por la norma AMCA 210.....	50
Figura 21. Diseño con dimensiones en función del diámetro.....	51
Figura 22. Visto lateral isométrico de la configuración e instalación del banco de pruebas.....	53
Figura 23. Diseño con dimensiones calculadas en función del diámetro.....	54
Figura 24. Tobera dimensiones e isométrico.....	55
Figura 25. Acople del ventilador a la tobera.....	56
Figura 26. Construcción del acople del ventilador a la tobera.....	56
Figura 27. Perforaciones que permiten la sujeción del acople.....	57
Figura 28. Isométrico del acople ensamblado.....	58
Figura 29. Construcción y ensamble del acople.....	58
Figura 30. Vista lateral ducto.....	60
Figura 31. Vista isométrica del ducto.....	60

Figura 32. Plano y vista isométrica del enderezador de flujo	61
Figura 33. Ubicación del enderezador de flujo dentro de la configuración del banco....	62
Figura 34. Enderezador de flujo al interior del ducto	62
Figura 35. Construcción y ensamble del enderezador de flujo	63
Figura 36. Vista isométrica del enderezador de flujo dentro del ducto	63
Figura 37. Modelo CAD del estrangulador de flujo	64
Figura 38. Anillos intercambiables del estrangulador de flujo	65
Figura 39. Matriz que soporta los anillos del estrangulador de flujo instalado	66
Figura 40. Manómetro seleccionado	67
Figura 41. Isométrico tubo de Pitot.....	68
Figura 42. Plano tubo de Pitot	68
Figura 43. Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro	69
Figura 44. Vista lateral tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro	69
Figura 45. Vista lateral Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro	70
Figura 46. Vista de techo Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro	70
Figura 47. Vista trasera Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro	71
Figura 48. Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas	72
Figura 49. Vista trasera Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas.....	72
Figura 50. Ensamble de las bases de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas.....	73
Figura 51. Vista frontal del ensamble final del banco de pruebas	73
Figura 52. Ensamble final del banco de pruebas	74
Figura 53. Ensamble final del banco de pruebas	74
Figura 54. Modelo CAD ensamble final del banco de pruebas	75
Figura 55. Vista lateral ensamble final del banco de pruebas	75
Figura 56. Vista lateral CAD ensamble final del banco de pruebas.....	76
Figura 57. Vista de techo ensamble final	78
Figura 58. Vista posterior construcción y ensamble final del banco de pruebas	79
Figura 59. Vista lateral construcción y ensamble final del banco de pruebas	80
Figura 60. Modelo CAD y piezas principales del ensamble final.....	81
Figura 61. Vista frontal construcción y ensamble final del banco de pruebas	82
Figura 62. Vista posterior construcción y ensamble final del banco de pruebas	83
Figura 63. Vista frontal- techo construcción y ensamble final del banco de pruebas	84
Figura 64. Vista lateral configuración construcción y ensamble final del banco de pruebas	85

Figura 65. Vista lateral construcción y ensamble final del banco de pruebas	86
Figura 66. Curva característica del ventilador sistema internacional.....	87
Figura 67. Curva característica del ventilador sistema ingles.....	89

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Clasificación de las turbomáquinas	25
Tabla 2. Metodología empleada en el diseño del banco de pruebas de ventilador axial	46
Tabla 3. Cálculos de instalación y configuración del banco	52
Tabla 4. Lista de componentes del banco de prueba	54
Tabla 5. Matriz de selección de material del ducto.....	59
Tabla 6. Cálculos estrangulador de flujo	65
Tabla 7. Componentes finales del banco de pruebas	77
Tabla 8. Valores obtenidos de la prueba en SI.....	87
Tabla 9. Valores obtenidos de la prueba en unidades del sistema ingles	88

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. M Manual de uso, mantenimiento y guía de laboratorio para práctica experimental del banco de pruebas de ventilador axial

Anexo B. Planos del banco didáctico de pruebas de ventilador axial

Anexo C. Costo final del proyecto

Anexo D. Plano e información técnica del tubo de Pitot

Anexo E. Plano e información técnica del manómetro diferencial Mark II 25

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidad
A	Área de sección transversal ducto de prueba	m ²
Dd	Diámetro del ducto de prueba	mm
Dv	Diámetro del ventilador	mm
H	Potencia de entrada del ventilador	W
Ho	Potencia de salida del ventilador	W
L	Longitud de la garganta de la tobera	mm
N	Velocidad de rotación del ventilador	rpm
n	Número de lecturas	-
Ps	Presión estática del ventilador	Pa
Pt	Presión total del ventilador	Pa
Pv	Presión dinámica del ventilador	Pa
Q	Caudal de aire en el ducto	m ³ /s
V	Velocidad lineal del flujo de aire	m/s
ΔP	Presión diferencial	m ³ /s
η s	Eficiencia estática del ventilador	%
η t	Eficiencia total del ventilador	%
ρ	Densidad del aire	kg/m ³
r	Lectura	-
1	Plano 1 - entrada del ventilador	-
2	Plano 2 - salida de ventilador	-
3	Plano 3 - estación transversal de Pitot	-

GLOSARIO

AMCA: Asociación Internacional de Movimiento y Control del Aire por sus siglas en inglés AMCA “Air Movement And Control Association International”.

CAUDAL CERRADO: el punto de operación donde la tasa de flujo de aire del ventilador es cero.

CAUDAL LIBRE: el punto de operación donde la presión estática del ventilador es cero y el caudal es máximo.

DENSIDAD DEL AIRE: es la masa por unidad de volumen de aire.

DUCTO: es una tubería empleada para el transporte de fluidos como líquidos y gases.

ENSAYO DE LABORATORIO: es proceso mediante el cual se pone a prueba el rendimiento del ventilador, mediante la medición de sus principales variables para la obtención de su curva característica.

FLUIDO COMPRESIBLE: fluido cuya densidad varía significativamente ante un cambio de presión.

FLUIDO INCOMPRESIBLE: fluido que en movimiento no cambia su densidad debido a la aplicación de presión, idealmente, es decir, no se compactan bajo la aplicación de fuerza, no reducen su volumen.

FLUJO: movimiento de un fluido.

FLUJO LAMINAR: es aquel en el que las partículas se desplazan en capas paralelas, o láminas, sin invadir el camino de las otras partículas.

FLUJO TURBULENTO: es aquel en el que hay fluctuaciones en el flujo todo el tiempo y las partículas invaden la trayectoria de las partículas adyacentes, mezclándose y desplazándose de una manera aleatoria.

LÍNEAS DE FLUJO: son líneas imaginarias que representan el movimiento de un fluido.

MANÓMETRO: elemento usado para medir la presión manométrica de un fluido.

PLANO DE MEDICIÓN: es la sección transversal en la cual se toma la presión del fluido, mediante el uso de un tubo de Pitot.

PRESIÓN: fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.

TOBERA: ducto convergente que, a través de la disminución de su sección transversal, produce un aumento en la velocidad y disminución de la presión del fluido que lo atraviesa.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN: número de revoluciones (vueltas) por unidad de tiempo que da un cuerpo alrededor de un eje.

VENTILADOR: es una turbomáquina hidráulica, que absorbe energía mecánica de su eje y la restituye al gas que circula a través del mismo para producir un flujo.

RESUMEN

El presente trabajo de grado expone el diseño y construcción de un banco didáctico de pruebas de ventilador axial, para los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja. El banco de pruebas constituye un espacio para la experimentación y puesta en práctica del componente teórico desarrollado en la asignatura Máquinas Hidráulicas. Beneficia de esta manera a estudiantes y profesores en la correcta articulación de la teoría con la práctica, para garantizar la enseñanza y aprendizaje óptimo.

El diseño estuvo regido por la norma AMCA 210, que especifica las características de diseño de bancos para pruebas de ventiladores axiales, junto con las condiciones, instrumentos y métodos que permiten realizar la prueba de laboratorio del ventilador para determinar su rendimiento aerodinámico y representarlo a través de su uso en las prácticas de laboratorio de turbomáquinas mediante la curva característica del ventilador axial.

Se construyó e instaló un banco didáctico de pruebas de ventiladores axiales de bajo costo, donde el ventilador axial es ensayado a diferentes regímenes de rotación, para determinar la presión y el caudal del flujo que produce, utilizando un tubo de Pitot estático conectado a un manómetro diferencial de columna de líquido. Posteriormente, se representan las parejas de datos obtenidos en una gráfica para obtener la curva característica del ventilador y su rendimiento.

Como resultado se obtiene el diseño de un banco de pruebas para ventilador axial normalizado bajo la norma AMCA 210 que permite la investigación formativa y la prueba de prototipos planteados en proyectos semestrales o semilleros de investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Palabras clave: Ventilador axial, rendimiento aerodinámico, banco de pruebas, AMCA 210, tubo de Pitot, curva característica

INTRODUCCIÓN

Son múltiples las aplicaciones a nivel industrial y cotidiano que requieren el uso de un ventilador axial como componente para mover aire. Ya sean dispositivos como disipadores de calor de componentes electrónicos, sistema de refrigeración de máquinas térmicas, ventiladores mecánicos para respiración artificial en pacientes con dificultades respiratorias; o procesos que involucran forzar aire como los ventiladores de tiro forzado en calderas; o turboventiladores en motores de reacción como turbinas para la propulsión de aeronaves y en sistemas HVAC, por sus siglas en inglés, para calefacción, ventilación y aire acondicionado¹ en plantas industriales y edificaciones, para sistemas de renovación de aire o seguridad laboral de contaminantes atmosféricos.

La selección del ventilador para cada aplicación se hace de acuerdo con las especificaciones de caudal y presión en su punto de operación. Estos parámetros se representan mediante la curva característica del ventilador, gráfica compuesta por las parejas de presión y caudal que puede mover el ventilador a diferentes velocidades de rotación. El ventilador entrega su energía, proveniente de una fuente externa, al fluido que se encuentra en estado gaseoso, sin producir cambios significativos en su densidad.

Por la amplia utilidad de esta turbomáquina en el mercado, un banco de pruebas para caracterizar ventiladores axiales es necesario. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo principal diseñar y construir un banco didáctico de pruebas para ventilador axial, que mediante la medición de variables como presión estática, presión dinámica y caudal, permita determinar el rendimiento del ventilador y representarlo a través de la curva característica. La investigación, se desarrolla a través de los siguientes objetivos específicos que detallan el proceso necesario para completar la investigación. Se inicia con realizar una revisión bibliográfica sobre bancos didácticos de ventiladores axiales utilizando fuentes académicas, comerciales y bases de datos, para dar paso a diseñar el banco didáctico, seleccionar los equipos, instrumentación y materiales correspondientes para, construir el banco didáctico de pruebas de ventilador axial, que a continuación permite realizar pruebas y análisis de resultados del banco didáctico de pruebas de ventilador axial construido y finalmente generar un manual de

¹ ASHRE. Handbook of refrigeration. Atlanta. ASHRE editions, 2018. 758 p. ISBN-13: 978-1939200976

uso y de mantenimiento para el banco didáctico para pruebas de ventilador axial al igual que generar una guía de laboratorio para práctica experimental para los estudiantes que usen el banco. Lo anterior en atención a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, Boyacá, Colombia para poner en práctica la profunda reflexión de Santo Tomás de Aquino según la cual: “El maestro que se limita a responder un problema solamente con argumentos deja al discípulo con la cabeza vacía”.

El banco didáctico de pruebas de ventilador axial aporta al desarrollo del componente práctico, característico y fundamental de la Ingeniería Mecánica, pues permite a docentes y estudiantes contar con una herramienta didáctica para experimentar con el funcionamiento de una turbomáquina, además de propiciar la creación de un centro de investigación formativa a servicio de estudiantes, profesores y eventualmente a disposición de la industria, como en la prueba de prototipos de ventiladores planteados en proyectos semestrales o semilleros de investigación. El banco de pruebas de ventilador amplía los servicios tecnológicos con los que cuenta la Universidad, pues a pesar de que actualmente a nivel global existen bancos de pruebas en el sector comercial, como la empresa española Zitrón, que cuenta con el banco de pruebas para ventiladores axiales más grande del mundo, o Edibon, que ofrece bancos enfocados a la academia, el presente banco será el primero a nivel local y destaca por su bajo costo.

Para lograrlo, se desarrolla una investigación aplicada bajo el método de diseño en Ingeniería. Se reconoce la necesidad de un banco de pruebas en la asignatura de máquinas hidráulicas y se realiza el diseño del mismo bajo la norma AMCA 210 “*Laboratory methods of testing fans for certified aerodynamic performance rating*” la cual rige a nivel mundial el diseño de este tipo de instalaciones y la prueba de ventiladores. Teniendo como parámetros adicionales de diseño, el espacio para ubicar el banco de pruebas en el laboratorio de la facultad y el costo del mismo, se simplificó la construcción no incluyendo partes del banco, bajo el análisis realizado. Posteriormente, se seleccionaron los equipos, instrumentación y materiales correspondientes para su construcción tomando en cuenta los propuestos por la norma como el tubo de Pitot y el manómetro de columna líquida, para posteriormente plasmar el diseño mediante un modelo CAD utilizando el Software Autodesk Inventor versión 2021. Por último, se construye y prueba el banco para concluir con el análisis de los resultados obtenidos. De igual forma, se generó un manual de uso y de mantenimiento, junto con una práctica experimental compuesta por una guía de laboratorio para el uso del banco didáctico de pruebas de ventilador axial.

En el capítulo 1 se encuentra el marco referencial, que trata las ecuaciones de conservación, de la masa y energía, con su derivación y simplificación (ecuación de Bernoulli); y el desarrollo de la norma AMCA 210; asimismo presenta los antecedentes de bancos construidos. El capítulo 2, presenta la metodología de diseño. En el capítulo 3 se desarrolla la metodología aplicada en el diseño y construcción del banco. En el

capítulo 4 se presentan los resultados de la práctica experimental del banco de pruebas de ventilador axial y finalmente conclusiones. Los anexos, al final del documento, contienen los planos de diseño y los manuales de uso y de mantenimiento.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

El acercamiento hacia la temática específica de bancos de pruebas para ventiladores axiales se realizó a través de la búsqueda de artículos, ponencias y trabajos de grado tanto a nivel nacional como internacional. Se analizaron y, a continuación, se presenta una breve revisión de los más relevantes.

Franklin Calderón realizó el trabajo “Implementación de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores de refrigeradores domésticos en la UPS Cuenca”². Este proyecto se toma como referencia ya que el banco presentado cumple la misma funcionalidad que tiene por objeto el presente proyecto. Es a partir del proyecto presentado que se tiene conciencia de la existencia de un ente rector a nivel global, que regula la caracterización de ventiladores mediante la obtención del caudal y la presión estática, dicho ente rector es la “*Air Movement and Control Association*” AMCA.

AMCA en su norma 210 titulada “Métodos de laboratorio de prueba de ventiladores para calificación de rendimiento aerodinámico certificado”³ establece métodos de prueba en laboratorio para ventiladores u otros dispositivos de movimiento de aire para determinar su rendimiento aerodinámico en términos de tasa de flujo de aire, presión desarrollada, consumo de energía, densidad del aire, velocidad de rotación y eficiencia para fines de calificación y garantía.

Rocha Andrés de la Universidad del Atlántico, en Barranquilla, Colombia en 2017 presentó el artículo de investigación titulado “Diseño de un banco de pruebas para ventiladores axiales en serie, norma ANSI/AMCA 210”⁴. Presentó la aplicación de la

² CAIDERÓN, Franklin. Implementación de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores de refrigeradores domésticos en la UPS Cuenca. Cuenca, Ecuador.: Universidad politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2018. 95 p.

³ AMCA, Inc., 2016. AMCA 210 Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. 12th ed. Arlington Heights, Illinois, US: AMCA Publications, p.79.

⁴ ROCHA, A., 2017. Diseño de un banco de pruebas para ventiladores axiales en serie, norma ANSI/AMCA 21. Scientia et Technica, [online] 4(22), pp.320-329. Available at: <<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia>> [Accessed 02 August 2019].

norma ANSI/AMCA 210 para la implementación de un banco de ventiladores axiales dispuestos en serie.

Juan Tangarife de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Colombia en 2015 presentó el trabajo de grado “Diseño de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores en refrigeradores domésticos”⁵, seleccionando la norma ANSI/ASHRAE 51-07 como la norma referente, la cual es el equivalente de la norma AMCA 210.

Enríquez David de la Pontificia Universidad Católica Del Perú, en 2013 presentó el trabajo de grado “Diseño de un Banco de Ensayos para ventiladores axiales de hasta 6000 m³/h”⁶, basados en los parámetros y consideraciones presentados por las normas ISO 5810 y la Norma AMCA 210-85.

Baño Óscar de la Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia en 2013 presentó el trabajo de grado “Diseño de un banco de ensayo para ventiladores”⁷. En este presenta el diseño de una instalación de ensayo de ventiladores industriales bajo la norma UNE-EN ISO 5801:2010, equivalente de la norma AMCA 210.

Chicas Francisco de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” del Antiguo Cuscatlán, El Salvador, en 2012 presentó el trabajo de grado “Diseño y construcción de un túnel de viento”⁸. En el cual, obtuvo el diseño y construcción un túnel de viento para prueba de perfiles aerodinámicos y modelos de máquinas que interactúen con el aire en movimiento.

Gonzales Salome de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú en 2011 presentó el artículo “Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes”⁹. Con el objetivo de conocer la

⁵ TANGARIFE, J., 2015. Diseño de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores en refrigeradores domésticos. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Medellín, Colombia.: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Mecánica

⁶ ENRIQUEZ, David. Diseño de un banco de ensayos para ventiladores axiales de hasta 6000 m³/h. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Lima, Perú.: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2013. 115 p.

⁷ BAÑO, Óscar. Diseño de un banco de ensayo para ventiladores. Cartagena, Colombia.: Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Térmica y fluidos, 2013. 181 p.

⁸ CHICAS, Francisco. Diseño y construcción de un túnel de viento. Antiguo Cuscatlán, El Salvador.: Universidad centroamericana José Simeón Cañas. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2012. 170 p.

⁹ GONZALES, Salome. Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes. Lima, Perú.: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2012. 14 p.

interacción dinámica entre un cuerpo sólido en estudio y el flujo uniforme del aire a diversas condiciones de velocidad, a través de la evaluación del comportamiento fluidodinámico, energético, aerodinámico y estabilidad de cuerpos sólidos.

Acevedo Felipe de la Universidad Eafit de Medellín, Colombia, 2006 presentó el trabajo de grado “Diseño de un túnel de viento para prueba de ventiladores y perfiles aerodinámicos”¹⁰ donde se evidencia el diseño de un túnel de viento que permite analizar fenómenos aerodinámicos sobre objetos, como fuerzas y líneas de corriente.

Por lo anterior, se toma como referencia para el desarrollo del presente trabajo la norma ACMA 210, la cual, a su vez, permite desarrollar del marco teórico.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Turbomáquina. Según Mataix¹¹ las turbomáquinas son máquinas de fluido en las cuales el intercambio de energía es debido a la variación del momento cinético del fluido al pasar por el órgano que se mueve con movimiento de rotación, dotado de álabes, al que se le denomina rotor como el que se muestra en la figura 1.

¹⁰ ACEVEDO, Felipe. Diseño de un túnel de viento para prueba de ventiladores y perfiles aerodinámicos. Medellín, Colombia.: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2006. 150 p.

¹¹ MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

Figura 1. Turbomáquina



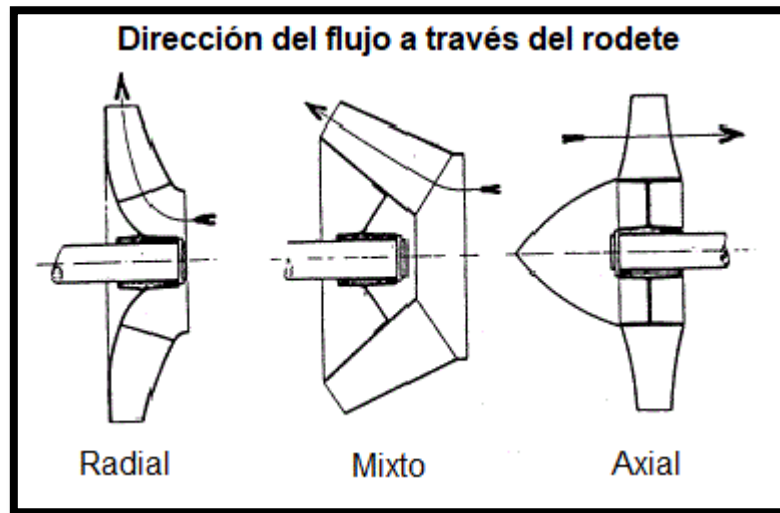
Fuente: CADFEM. Turbomachinery Design with ADT turbodesign Suite. [Imagen]. How to achieve high efficiency and performance with 3D Inverse Design. 2020. Disponible en: <https://www.cadfem.net/gb/en/shop/events/webinars/turbomachinery-design-with-adt-turbodesign-suite-17038.html>

Las turbomáquinas se clasifican en turbomáquinas hidráulicas y turbomáquinas térmicas de acuerdo a Mataix, dependiendo de la compresibilidad del fluido en el interior de la máquina, si el fluido sufre un cambio en su densidad se considera térmica, de lo contrario es hidráulica.

Mataix clasifica las turbomáquinas generadoras de acuerdo el sentido de transmisión de energía. Cuando el fluido cede energía al rodete se clasifica como turbomáquina motora y cuando el rodete sede energía al fluido se conoce como turbomáquina generadora, lo que provoca que la energía del fluido a su paso por el rodete aumente a diferencia de las motoras donde disminuye su energía.

Según la dirección del flujo en el rodete por donde circula el fluido se clasifican en radiales, axiales o mixtas. Donde en la radiales, el flujo entra paralelo al eje de la turbomáquina y sale en dirección radial (perpendicular) a este, en la axiales el flujo entra axial (paralelo) al eje y sale de igual modo, mientras en las mixtas el fluido entra axial (paralelo) al eje y sale en diagonal, es decir con componentes tanto radiales como axiales, como se muestra en la figura 2.

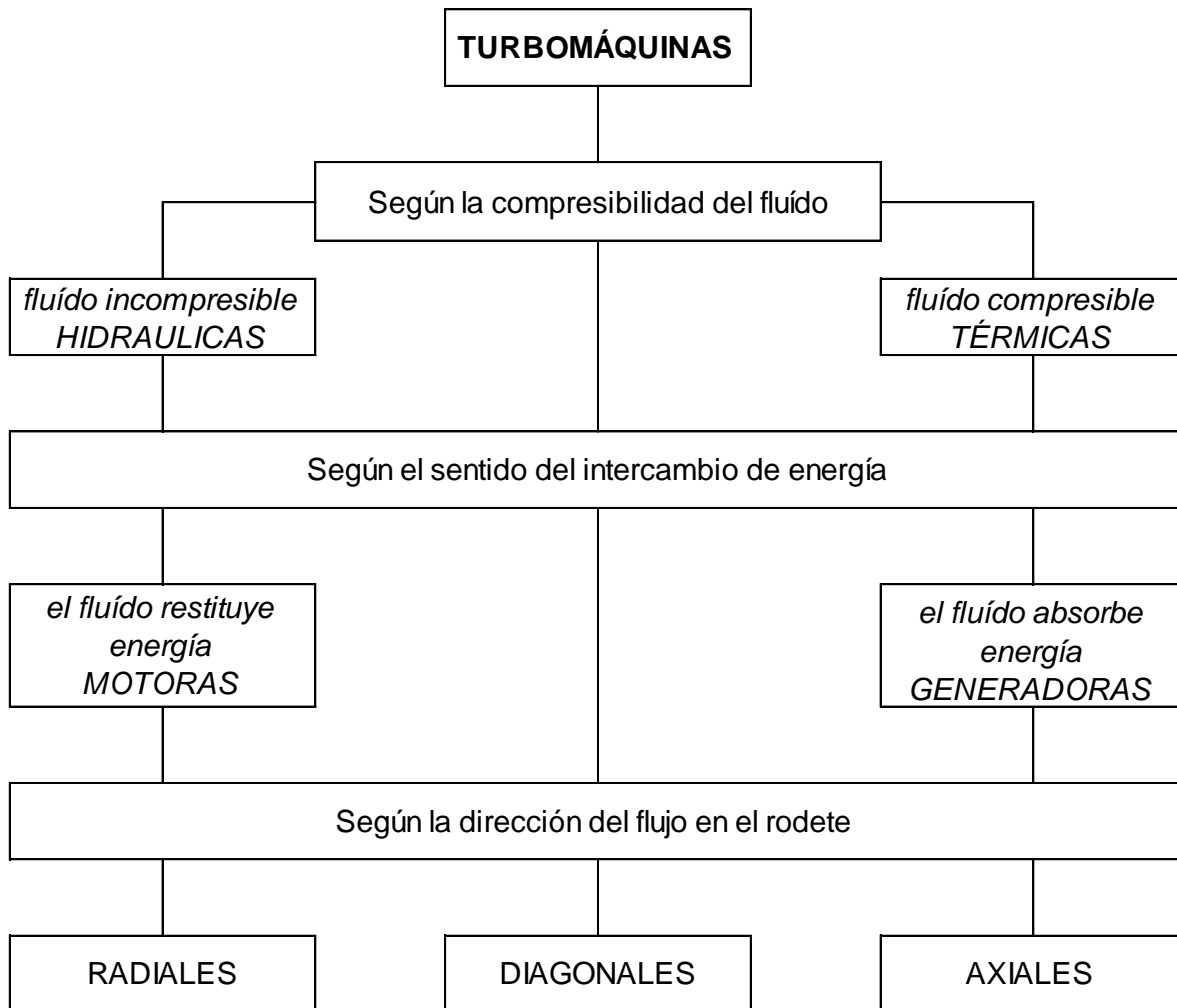
Figura 2. Clasificación de los rodets según la dirección del flujo



Fuente: MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

La clasificación general de las turbomáquinas se expone a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las turbomáquinas

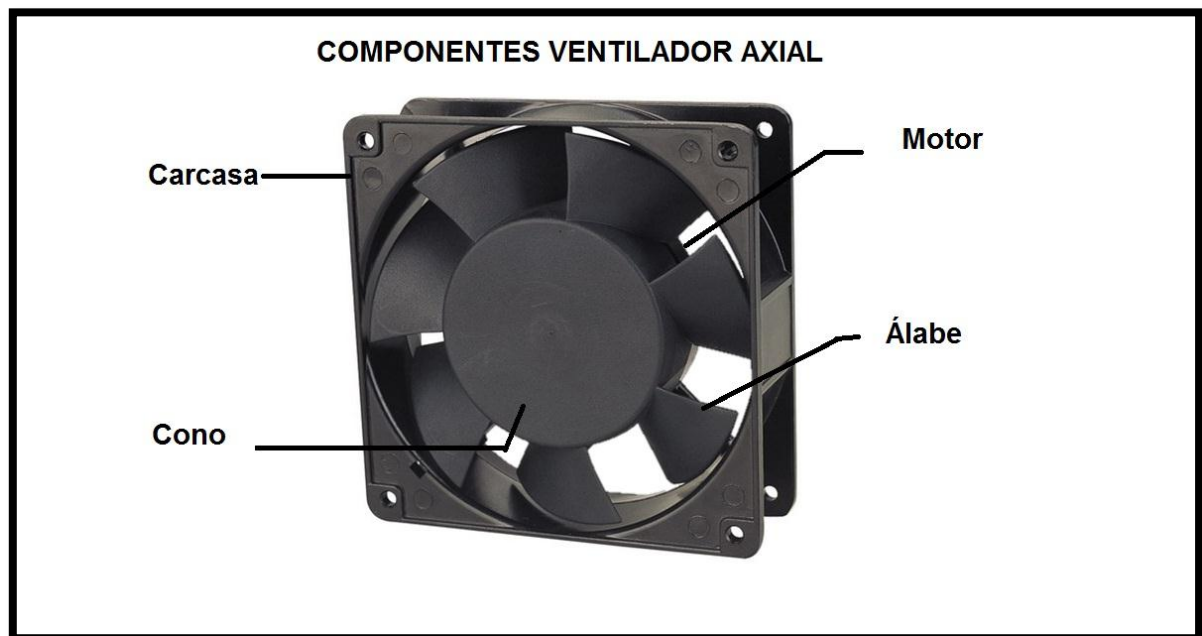


Fuente: elaboración propia, con base en MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

1.2.2 Ventilador axial. Un ventilador axial es una turbomáquina generadora hidráulica, que entrega energía desde la máquina al fluido en estado gaseoso sin producir un cambio considerable en su densidad. Sirve para transportar gases en dirección axial, a través, del intercambio energía mecánica que absorbe del eje

conductor de la turbomáquina y la restituye por medio de los álabes del rodete al gas circula de forma continua a través de este. En la figura 3 se muestran los componentes del ventilador axial. El impulso que el gas recibe es producido por el cambio de su momento cinético debido a la interacción con el rodete del ventilador, a su vez presenta variaciones en la energía bajo el principio de conservación de la energía. El cambio de energía se manifiesta mediante el aumento de la presión o velocidad del gas. El ventilador axial produce un incremento bajo en la presión y alto en el caudal moviendo el flujo sin cambiar su dirección, ya que la mantiene paralela al eje del ventilador.

Figura 3. Componentes del ventilador axial



Fuente: elaboración propia, con base en RoHS, compliant. AC axial fan and blower [imagen]. Producto. España; RoHS compliant. 2020. p. 28. [Consultado: 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://static.chipdip.ru/lib/045/DOC003045837.pdf>

La relación de compresión (presión final/presión inicial) de un ventilador es inferior a 10 kPa (100mbar). Por tanto, los ventiladores se utilizan en aquellos casos en que se precisa mover grandes cantidades de aire (caudal) con un incremento de presión bajo, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Aplicaciones comunes de los ventiladores axiales



Fuente: elaboración propia, con base en ASHRE. Handbook of refrigeration. Atlanta. ASHRE editions, 2018. 758 p. ISBN-13: 978-1939200976

1.2.2.1 Clasificación de los ventiladores. Los ventiladores axiales están clasificados por la diferencia de presión que son capaces de imprimir sobre el fluido. Según el incremento de presión agregado al aire, pueden ser:

- Ventiladores de baja Presión: $\Delta p < 1 \text{ kPa}$ (10 Mbar).
- Ventiladores de media Presión: $\Delta p < 3 \text{ kPa}$ (30 Mbar).
- Ventiladores de alta Presión: $\Delta p < 10 \text{ kPa}$ (100 Mbar).

1.2.3 Laboratorios de ensayo de ventiladores. Según Mataix “los ensayos de laboratorio que se pueden efectuar sobre un ventilador pueden clasificarse en dos tipos: ensayos de investigación y ensayos rutinarios para desarrollo de nuevos tipos que incluyen obtención de curva o curvas características”¹². En el primer grupo se llevaban a cabo ensayos que tienen por objeto poner a prueba nuevos modelos propuestos en busca de mejor rendimiento, del mismo modo, optimización de modelos para disminuir los niveles de ruido que producen los ventiladores en su funcionamiento. En cuanto a los ensayos rutinarios, estos tienen por objeto determinar la curva característica del ventilador ya sea para determinar el rendimiento de un modelo que se encuentra en su fase de producción, para verificar la operación de los ventiladores o para comprobación de garantía del mismo.

Los principales fabricantes de ventiladores cuentan con un banco de pruebas de ventilador como elemento para determinar el rendimiento y proveer la garantía de sus productos. Estos centros de ensayo se encuentran agrupados por la *Air Moving and Conditioning Association AMCA*, ente fundado en 1965 que agrupa a los principales fabricantes de ventiladores en Estados Unidos y Canadá con el objeto de elaborar las normas de ensayo, las cuales son revisadas periódicamente y han sido mundialmente implementadas por otros países. De igual forma, son los encargados de expedir certificaciones AMCA de aprobación de laboratorios para prueba de ventiladores.

1.2.4 Pruebas de ventilador bajo AMCA. Son pruebas llevadas a cabo para determinar el rendimiento de un ventilador que se realiza en una instalación controlada. La asociación americana presenta en su norma AMCA 210 “*Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating*” el método de prueba de laboratorio que se debe seguir sobre un ventilador u otro dispositivo de movimiento de aire para determinar su rendimiento aerodinámico en términos de caudal de aire, presión desarrollada, potencia consumo, densidad del aire, velocidad de rotación y eficiencia a efectos de calificación o garantía¹³. Se aplica a un ventilador u otro dispositivo de movimiento de aire cuando se utiliza aire como gas de prueba. Para lograrlo la norma primero establece la instalación con la que se debe contar para realizar la prueba y

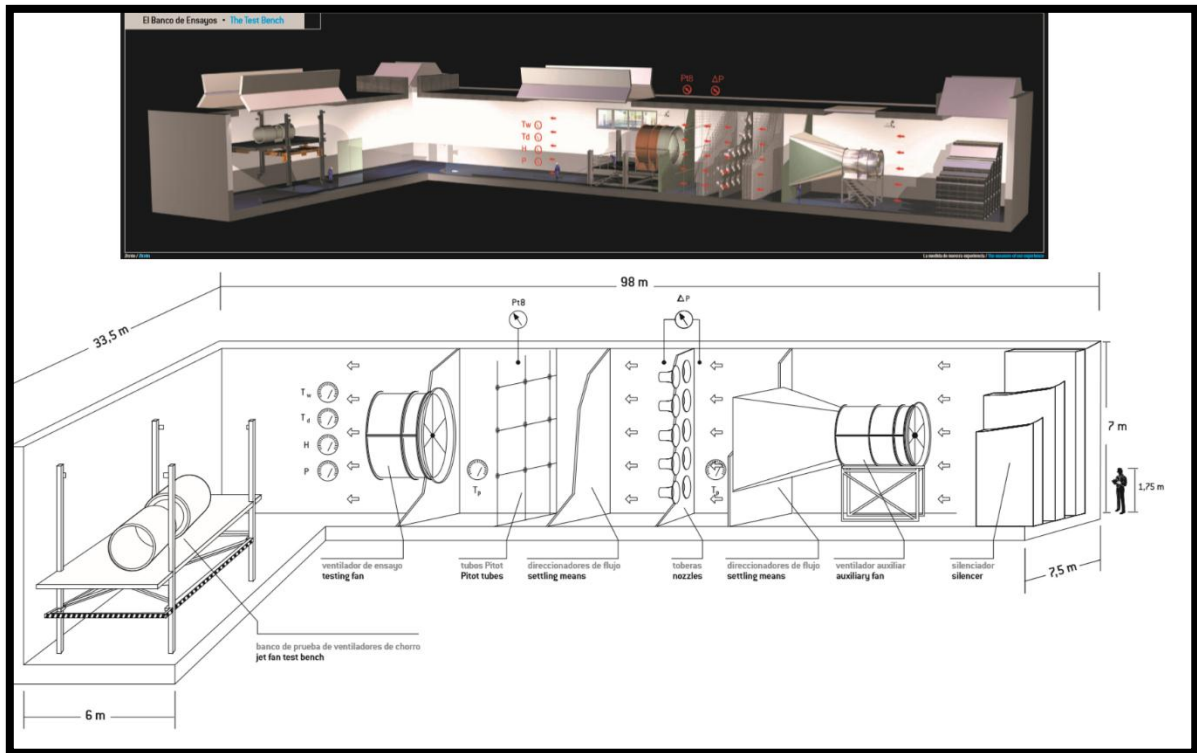
¹² MATAIX, Claudio. *Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas* 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

¹³ AMCA, Inc., 2016. *AMCA 210 Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating*. 12th ed. Arlington Heights, Illinois, US: AMCA Publications, p.3.

posteriormente la presentación de los resultados que se deben presentar bajo la gráfica conocida como la curva característica del ventilador.

1.2.5 Banco de pruebas de ventilador axial bajo la norma AMCA 210. Es una instalación que permite llevar a cabo la determinación de los valores de las variables de presión y caudal del flujo producido por el ventilador a prueba. La norma AMCA 210, presenta los instrumentos y métodos de medición con los que debe contar el banco para determinar los valores de las variables del flujo además de la configuración de prueba y equipo que indica la ubicación de los elementos dentro del banco para obtener con mayor precisión los valores del flujo. Un ejemplo de banco normalizado bajo la norma AMCA 210 es el banco de pruebas más grande del mundo de la empresa española Zitrón, las dimensiones se muestran en la figura 5.

Figura 5. Banco de pruebas de ventilador axial más grande del mundo



Fuente: elaboración propia, con base en ZITRÓN. Banco de ensayos de Zitrón. Banco de pruebas más grande del mundo certificado AMCA 210. Asturias, España.:Zitrón Global. Servicios. 2020 disponible en: <https://zitron.com/services/banco-de-ensayos-de-zitron/?lang=es>

1.2.5.1 Funcionamiento del banco de pruebas de ventilador axial bajo la norma AMCA 210. El banco de pruebas de ventilador opera bajo las tres ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos: la ecuación de continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento, y la ecuación de la conservación de la energía¹⁴. En el banco, el ventilador se acopla a un conducto ya sea a la salida o entrada del mismo, el cual compuesto de elementos que permiten producir un flujo estable y uniforme como los enderezadores de flujo, da paso a la estación de medición que permite medir los cambios de presión y caudal a través del uso de manómetros diferenciales análogos o digitales con su sonda del flujo de aire producto de la acción del ventilador para finalmente representarlos en la curva característica que muestra el rendimiento de éste. El flujo de aire a través del banco de pruebas es un movimiento de masa que tiene lugar bajo la conservación de la materia, en su derivación más conocida como la ecuación de continuidad. El flujo de aire es producido por el impulso que este recibe al entrar en contacto con los alabes del rodete del ventilador a prueba, ya que este le cambia su cantidad de momento cinético bajo la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. El intercambio energético entre el ventilador y el fluido se manifiesta en los cambios de presión y velocidad que sufre el flujo producido por este, los cuales, están regidos por la conservación de la energía en su conocida formulación de la Ecuación General de la Energía que incluye también la cuantificación de las pérdidas de presión por fricción producidas por el paso del aire a través ducto y el enderezador de flujo, a su vez, está su derivación en fluidos representada por la ecuación de Bernoulli comúnmente aplicada.

1.2.5.2 Ecuación de continuidad. Es la ecuación que representa la ley de conservación de la masa. Tiene lugar cuando un volumen de fluido circula a través de un ducto de área determinada, y postula que la cantidad de fluido debe permanecer constante a su paso por este¹⁵. Al igual que la energía, la masa es una propiedad conservada y que no puede crearse ni destruirse durante un proceso. La ecuación de continuidad, se obtiene a partir de simplificaciones como las líneas de corriente para considerar todo el flujo de fluido como uno solo, se considera que el fluido es incompresible, que la temperatura del flujo no cambia, que el flujo es laminar y no turbulento, es continuo, es decir, su presión y velocidad no dependen del tiempo, y

¹⁴ Mott, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

¹⁵ MOTT, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

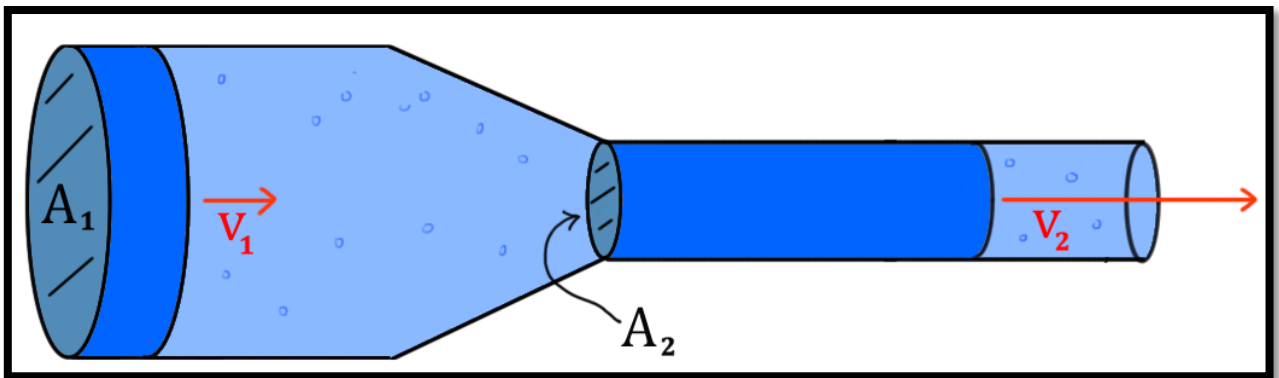
finalmente, que no existen pérdidas por rozamiento, es decir, no hay viscosidad. La cantidad de volumen que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo se conoce como flujo volumétrico o caudal. Se obtiene a partir de la ecuación:

$$Q = Av$$

Donde V es la velocidad promedio del flujo y A es el área de la sección por tanto las unidades son m^3/s .

Si se considera que un fluido circula por un conducto con un caudal constante de la sección 1 a la sección 2, sin que se agregue fluido ni se almacene o retire, entonces la masa de fluido que circula por la sección 2 en cierta cantidad de tiempo debe ser la misma que circula por la sección 1, como se muestra en la figura 6. Es decir, la cantidad de fluido que circula a través de cualquier sección en cierta cantidad de tiempo es constante.

Figura 6. Flujo de un fluido a través de diferentes secciones



Fuente: elaboración propia, con base en Mott, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

Esto se expresa en términos del flujo másico así:

$$Q_1 = Q_2$$

Donde,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

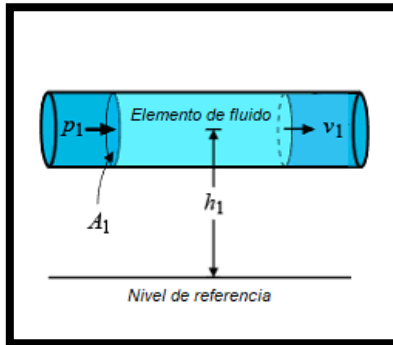
A esta ecuación que es el enunciado matemático del principio de continuidad se le denomina ecuación de continuidad. Siendo válida para todos los fluidos.

1.2.5.3 Ecuación general de la energía. Es una ecuación fundamental que describe el proceso de conservación de la energía de un sistema aislado, se basa en el principio “la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”¹⁶. La energía total de un sistema aislado por tanto permanece constante. En mecánica de fluidos, si se considera un elemento de fluido, como el mostrado en la figura 7, su energía total estará compuesta por la energía interna del fluido, debido a la energía intrínseca de las partículas, es decir las interacciones del sistema atómico con los alrededores, la energía cinética provocada por su movimiento, esto es la velocidad (v) específicamente, la energía potencial debida a la acción de la gravedad en función de la altura a la que ubique el elemento, esto es la elevación (z) respecto a un nivel de referencia. Finalmente, la ecuación de la energía considera las respectivas pérdidas y adiciones de calor y trabajo. Siendo pérdidas de energía cuando por efectos de la fricción o el calor, se disipa energía y adiciones, cuando un sistema externo hace trabajo sobre el mismo. Esta transformación se da entre los diversos tipos de energía, siendo idealmente proporcionales, pues si cierta energía se perdió en forma de energía cinética, puede que se haya transformado en potencial, y sea exactamente la misma cantidad de energía solo que manifestada de otra forma. Dicho cambio se representa por el balance entre la entrada y la salida de energía, se expresa a continuación:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E$$

¹⁶ CENGEL, Yunus. Termodinámica. 7 ed. 2012. Traducido por Gabriel Nagore Cázares. McGraw-Hill.: 1005 p. ISBN 9786071507433.

Figura 7. Energía total de un elemento de fluido



Fuente: elaboración propia, con base en Mott, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

1.2.5.4 Ecuación de Bernoulli. Es una reformulación de la Ecuación General de la Energía, que, al ser un principio fundamental en todas las disciplinas científicas, permite ser simplificada de acuerdo al área de aplicación. En el caso de la Mecánica de Fluidos, esta reformulación se conoce como la ecuación de Bernoulli, desarrollada por Daniel Bernoulli en 1738¹⁷. Esta ecuación describe el comportamiento para el flujo de un fluido, y cuantifica cada una de las energías que componen la energía total del fluido. Al tratarse de una reformulación, incorpora un tipo de energía que es característico de los fluidos, esta es la energía de presión o de flujo, que representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de cierta sección contra la presión del fluido. La ecuación de Bernoulli proporciona una relación entre la presión, la velocidad y la altura como se muestra en la figura 8.

Sin embargo, al ser una ecuación idealizada presenta una serie de restricciones, ya que todos los fluidos son viscosos y, por tanto, todos los flujos tienen algún efecto de la fricción como la producida por las paredes sólidas donde fluye el fluido, se considera que el flujo es estacionario, es decir, no cambian las propiedades respecto al tiempo, e incompresible (densidad constante) variación de la densidad con la presión.

Obteniéndose la ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario, incompresible y sin fricción a lo largo de una línea de corriente. El calor y el trabajo mencionados en el

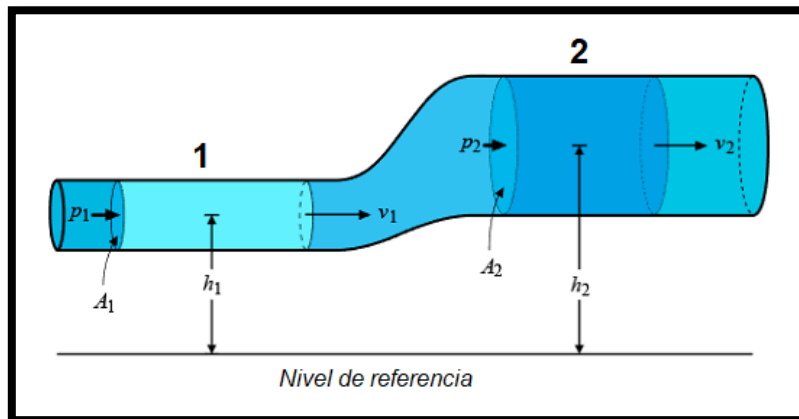
¹⁷ WHITE, Frank. Mecánica de fluidos, 5 ed. 2004. Traducido por Marcos Vera Coello McGraw-Hill.: 816 p. ISBN 9788448140762.

Ecuación General de la Energía, son simplificados en la ecuación de Bernoulli, de manera que asume que no hay trabajo por bombas o turbinas en la línea de corriente, y se supone que no hay transferencia de calor, es decir, ni adición ni extracción.

La relación inversa entre la presión y la velocidad en un punto en un fluido se conoce como el principio de Bernoulli. La ecuación de Bernoulli relaciona la presión, la velocidad y la altura de dos puntos cualesquiera (1 y 2) en un fluido con flujo laminar constante de densidad, por tanto, es el resultado de aplicarle la conservación de la energía a un fluido que se mueve.

Se representa un volumen de control que coincide con un tubo de corriente infinitesimal de área variable sección transversal A , donde se representa la dirección de la línea de corriente. Con la aplicación de la segunda ley de Newton la ley fundamental de la dinámica fuerza igual a masa por aceleración a una partícula de fluido con longitud L y área de sección transversal A . Las fuerzas que actúan sobre la partícula son el peso y la presión.

Figura 8. Flujo de un fluido a través de un conducto



Fuente: elaboración propia, con base en Mott, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Donde,

P_1 es la energía de presión

$\frac{1}{2}v_1^2$ es la energía cinética

ρgh_1 es la energía potencial

Soportada en la anterior base teórica, Dwyer en su catálogo de productos presenta el proceso de medición recomendado¹⁸ en conductos avalado por los diferentes reguladores como AMCA o ASHRAE. Multiplicando la velocidad del aire por el área de la sección transversal del ducto se obtiene el caudal. Este flujo de aire producido por el ventilador está compuesto por dos presiones. La primera, presente solo en la dirección del movimiento, debido a la inercia se desarrolla la presión dinámica, la cual, está relacionada directamente con la velocidad y la segunda, independiente del movimiento del aire y perpendicular en todas las direcciones del ducto y producto del peso del fluido se desarrolla la presión estática. La presión estática es negativa a la entrada del ventilador, ducto de succión, y es estática positiva a la salida, en el ducto de impulsión del ventilador.

$$P_T = P_s + P_d$$

La presión total de una corriente de aire que fluye en un conducto es la suma de la presión estática presión soportada por las paredes laterales del conducto y la presión dinámica producto del impacto del aire en movimiento. Medir la presión dinámica directamente no es posible, por tanto, se mide a través de esta relación restando la presión estática a la presión total para determinar la presión dinámica. Este proceso lo hacen directamente los elementos de medición. Para esto es necesario un manómetro diferencial junto con un tubo de Pitot. El tubo de Pitot¹⁹ capta la señal de presión

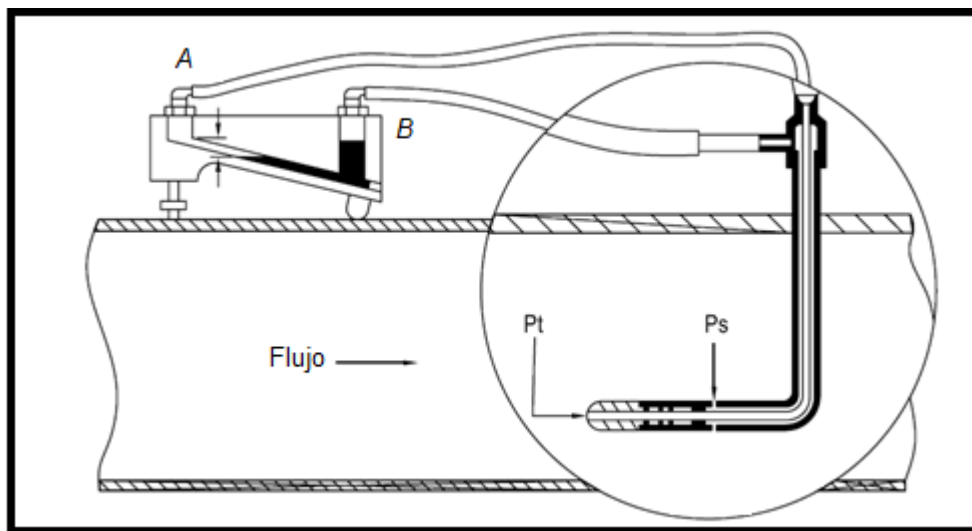
¹⁸ Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

¹⁹ Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

(siendo un instrumento) y el manómetro (sensor) la traduce. El tubo de Pitot incorpora sensores de presión estática y total en una sola unidad.

A través del tubo de Pitot se trasfiere los valores de presión desde los orificios de detección a la conexión de presión total y presión estática, al lado de presión alta (A) o presión baja (B) de un manómetro diferencial indicándose la presión dinámica directamente en el manómetro y posteriormente mediante cálculos se obtiene el aire correspondiente velocidad del flujo, como se muestra en la figura 9. Las conexiones estáticas y las conexiones de presión total conectadas simultáneamente al manómetro cancelan el efecto de la presión estática, dado que esta se aplica a ambos lados del manómetro e indica solo la presión dinámica.

Figura 9. Procedimiento para medir las variables de flujo



Fuente: elaboración propia, con base en Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

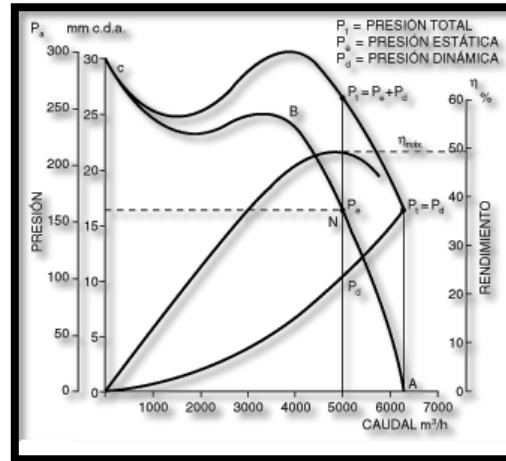
1.2.6 Curvas características. La curva característica de un ventilador es una representación gráfica de la relación directa entre las variables del flujo de aire a su

paso por el ventilador en funcionamiento²⁰. El conjunto de puntos sobre los cuales se traza la curva del ventilador, se obtienen de la relación entre el caudal y la presión. Desde caudal cero, la presión estática es máxima y caudal máximo la presión estática es cero. Además de incluirse información adicional de funcionamiento como la potencia y la eficiencia de la turbomáquina.

La curva característica del ventilador compone la información técnica que permite la selección de este en las aplicaciones para las que sea requerido. Por tanto, cada ventilador tiene su curva única. En esta, se representa la totalidad de todos los posibles puntos de trabajo del ventilador, sin embargo, solo en el punto de operación se presentan las prestaciones máximas del ventilador, zona que, dependiendo del ventilador, tipo y tamaño, es recomendable su uso. Finalmente, la curva característica describe en función del caudal y presión el funcionamiento del ventilador. Sin esta, no es pues esta relación es necesaria. El caudal se grafica en el eje X y la presión en el eje Y. La única forma de obtener las curvas características se apoya en los ensayos. Las curvas características se trazan para la velocidad de giro del eje n constante (rpm). El caudal Q se toma como variable independiente básica. Como variables dependientes, se consideran la presión (incremento de presión Δp para gases), la potencia y el rendimiento η . La parte de pendiente positiva de la curva puede ser inestable y originar oscilaciones de bombeo. El rendimiento η siempre es nulo cuando no hay flujo y cuando $Q = Q_{\text{máx}}$, alcanzando su máximo, entre el 80 y el 90. Éste es el punto de máximo rendimiento $\eta = \eta_{\text{máx}}$. Es deseable que la curva de rendimiento sea plana en las proximidades de $\eta_{\text{máx}}$, de forma que se disponga de un rango de operación lo más amplio posible, aunque no todos los diseños consiguen curvas de eficiencia planas. Un ejemplo de curva modelo de un ventilador axial se muestra en la figura 10.

²⁰MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

Figura 10. Curva característica de un ventilador axial



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Sin embargo, la norma AMCA 210 aclara que para ventiladores axiales la curva característica puede ser representada solo con la curva característica de presión y caudal. Comercialmente, los ventiladores solo incluyen esta curva.

1.3 MARCO CONCEPTUAL

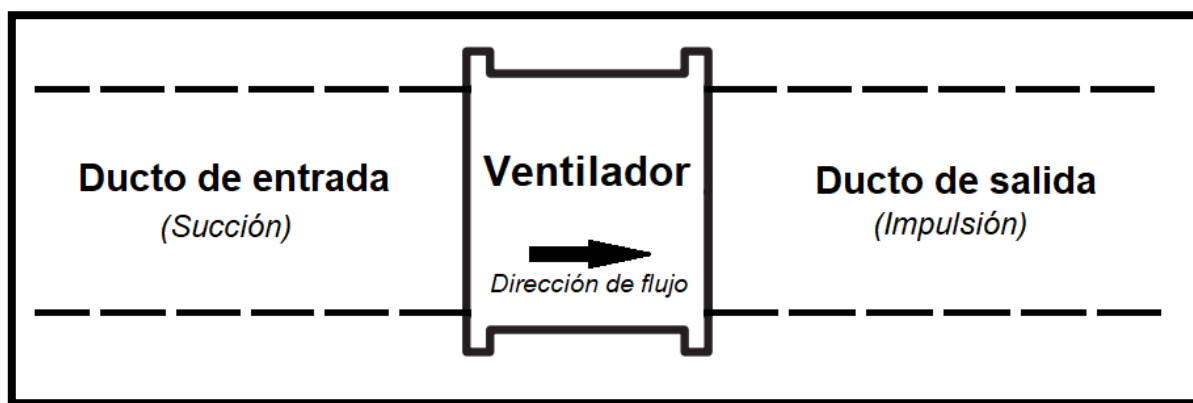
1.3.1 Instalación. Determina el recorrido del aire en el banco de pruebas ya que determina si se emplea o no ductos a la entrada y salida del ventilador axial²¹, como se muestra en la figura 11. Los ductos, además proporcionan soporte a los elementos de

²¹ AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

medición que implementa el banco. Son cuatro los tipos de instalación que puede adoptarse para el banco de pruebas. Como se muestra a continuación:

- A Entrada libre: salida libre
- B Entrada libre: salida en ducto
- C Entrada en ducto: salida libre
- D Entrada en ducto: salida en ducto

Figura 11. Tipo de instalación de prueba



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

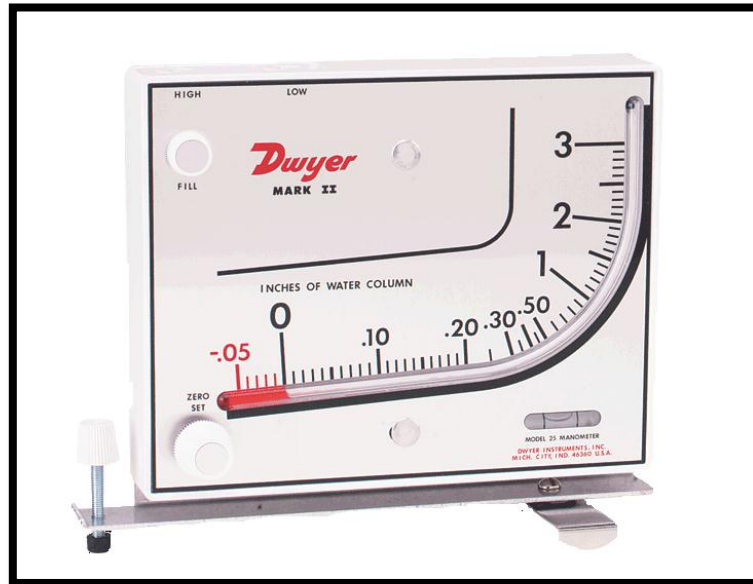
1.3.2 Configuración de prueba y equipo. Hace referencia a la disposición de los elementos constitutivos del banco dentro de la instalación seleccionada. En este se especifica, la ubicación que tendrán los elementos respecto al ventilador y el método de medición que se debe emplear como tubo de Pitot o sondas específicas de acuerdo a la presión que se desee medir.

1.3.3 Componentes del banco de prueba de ventilador axial. A continuación, se describe cada uno de los elementos que componen el banco de pruebas, se presenta una figura representativa del elemento o componente y su descripción.

1.3.3.1 Manómetro diferencial de columna de líquido. Es un instrumento de medición que mide la diferencia de presión entre dos puntos (presión alta y presión baja) de un fluido. De igual modo toma como referencia la presión atmosférica para medir presiones

mayores o menores a esta, a través de un fluido que recibe los cambios de presión y es susceptible a estos cambios para indicarlos a través de una escala graduada en el instrumento en caso de que se conecte solo uno de los extremos del manómetro. Por tanto, son sensores analógicos.

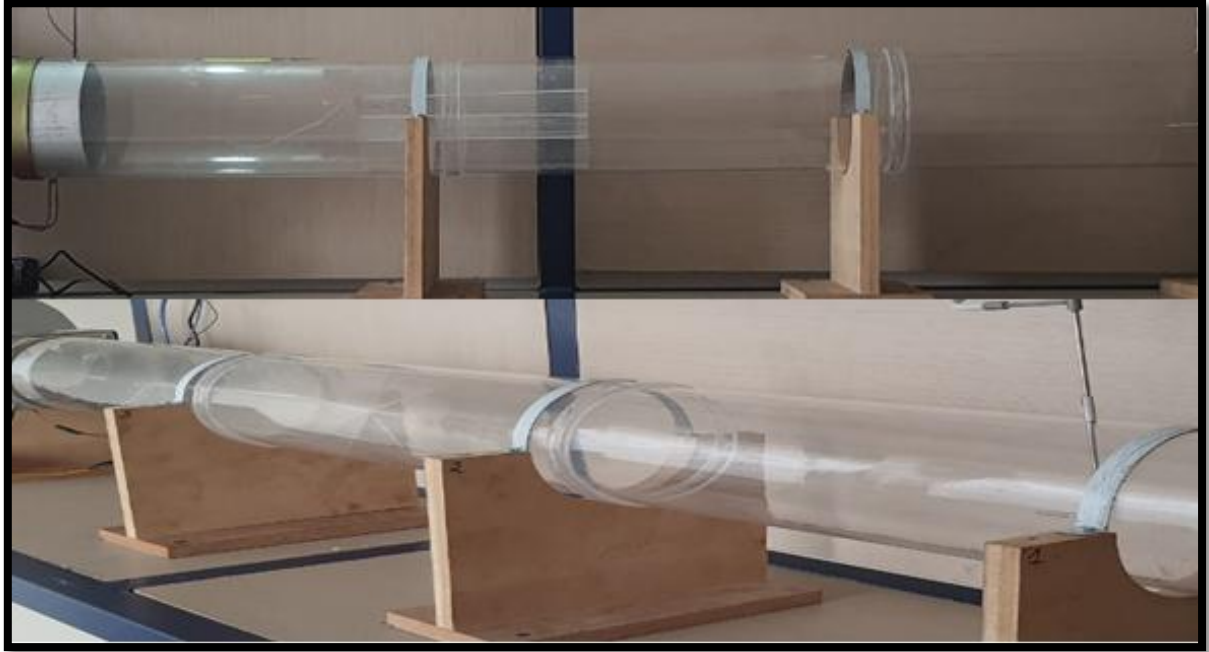
Figura 12. Manómetro diferencial de columna líquida



Fuente: elaboración propia, con base en Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

1.3.3.2 Ducto. Es un elemento de sección circular y uniforme, recto, como se muestra en la figura 13, que proporciona un plano de medición para las variables que intervienen en el funcionamiento del banco de pruebas. Tiene como función direccionar el aire a su paso por el banco de pruebas, además de proporcionar soporte al plano de medición ubicado dentro de este. Es un conducto de sección transversal circular o un diámetro de sección transversal rectangular (Diámetro hidráulico), recto y de sección transversal circular uniforme. Tal conducto puede servir como un conducto de entrada o un conducto de salida. El ducto es la pieza que le sigue al ventilador, el extremo libre del tubo se ubicó un dispositivo de estrangulamiento para controlar el punto de operación del ventilador, simulando así las condiciones que se espera que el ventilador encuentre en servicio.

Figura 13. Ducto



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

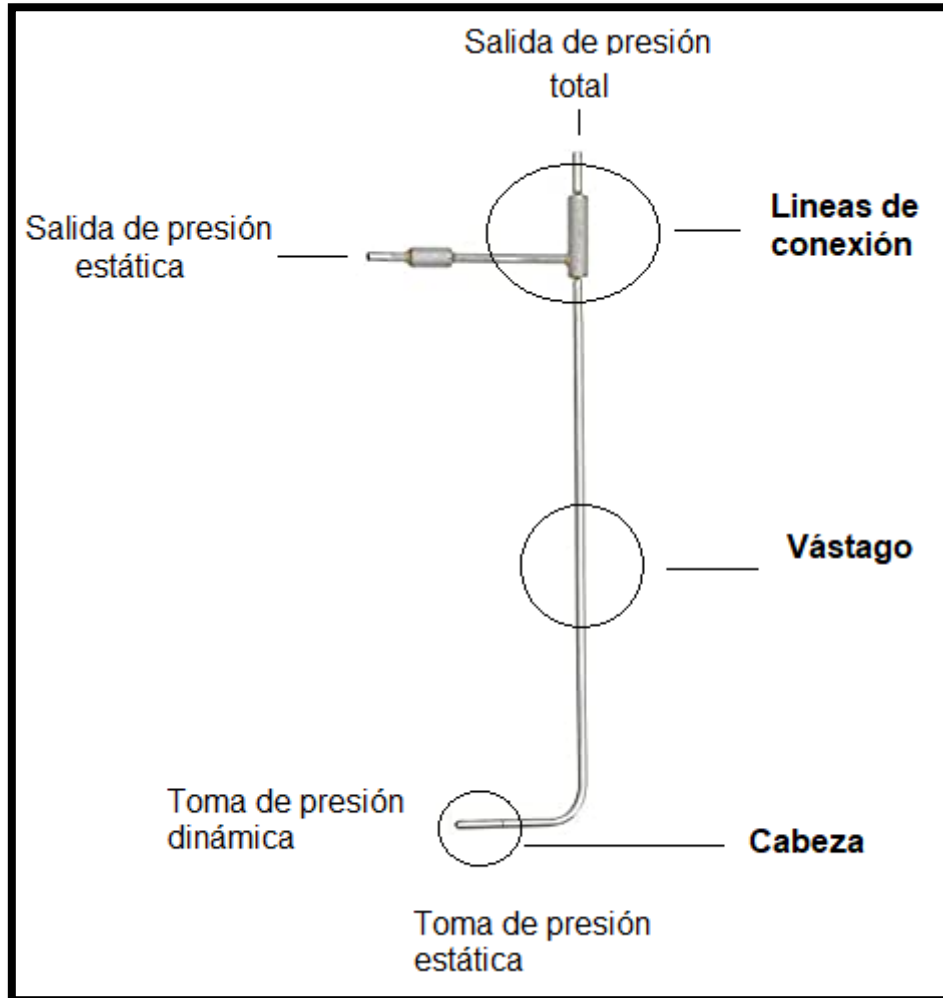
1.3.3.3 Tubo de Pitot. Es un elemento de medición primario usado para la medida de la velocidad de un fluido en punto determinado. Usado para mediciones de presión a partir de la medición de la velocidad del fluido. Llamado en honor a su inventor Henri Pitot en 1732. El nombre de tubo de Pitot ha sido aplicado a dos clasificaciones generales de instrumentos, la primera es un tubo que mide solo la presión total, conocido simplemente como tubo de Pitot, y la segunda, llamado Tubo de Pitot estático que mide la presión total y la presión estática en un solo instrumento primario de medición, mediante la combinación de dos tubos concéntricos, uno central con un extremo abierto que apunta hacia arriba del flujo de fluido y el otro cerrado al final pero con pequeños agujeros perforados en ángulo recto a la dirección del flujo. El tubo de Pitot incorpora sensores de presión estática y total en una sola unidad²². Esencialmente, el tubo de Pitot consiste en un tubo de impacto (que recibe la entrada

²² Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

de presión total) sujetado concéntricamente dentro de un segundo tubo de diámetro ligeramente mayor que recibe la entrada de presión estática de los orificios de detección radial alrededor de la punta. El espacio de aire entre los tubos interior y exterior permite la transferencia de presión desde los orificios de detección a la conexión de presión estática en el extremo opuesto del tubo de Pitot y luego, a través de la tubería de conexión, al lado de presión baja o negativa de un manómetro. Cuando el tubo de presión total está conectado al lado de alta presión del manómetro, la presión de velocidad se indica directamente. Un tubo de Pitot está compuesto esencialmente por tres partes: cabeza, vástago o línea de conexión entre la cabeza e instrumento indicador de presión como se muestra en la figura 14, principalmente un manómetro de columna líquida.

El tubo de Pitot depende del principio de que un tubo colocado con su extremo abierto en una corriente de fluido detendrá esa parte del fluido que incide en él, y la pérdida de energía cinética se convertirá en un aumento medible en la presión dentro del tubo.

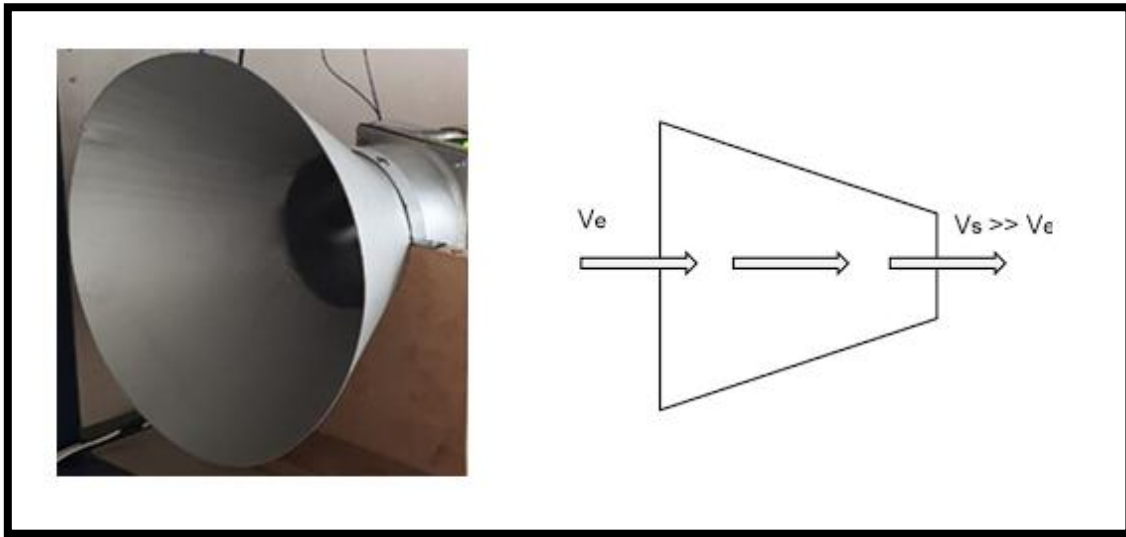
Figura 14. Partes de un tubo de Pitot



Fuente: elaboración propia, con base en Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

1.3.3.4 Tobera: es un ducto convergente que, a través de la disminución de su sección transversal como se muestra en la figura 15, produce un aumento en la velocidad y disminución de la presión del fluido que lo atraviesa. La tobera se puede considerar como un transformador de energía que toma energía de presión y la transforma en energía cinética, ya que el fluido a medida que recorre la sección va sufriendo dicha transformación.

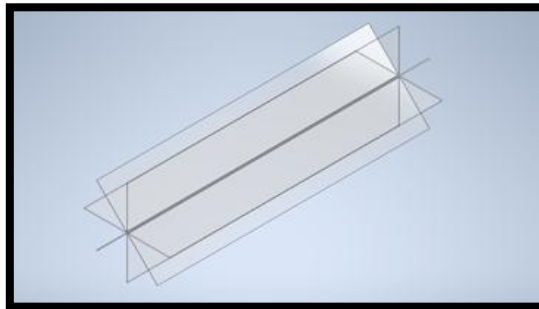
Figura 15. Tobera



Fuente: elaboración propia, con base en Mott, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

1.3.3.5 Enderezador de flujo. Es un dispositivo que tiene como función eliminar la componente radial que se genera en el fluido al paso por el ventilador y de esta forma garantizar que el flujo es estable y lo más similar a un flujo laminar para obtener una mejor medición de presión. El enderezador de flujo permite hacer que las líneas de flujo sean paralelas al eje del ducto, además para eliminar la componente radial de la velocidad absoluta.

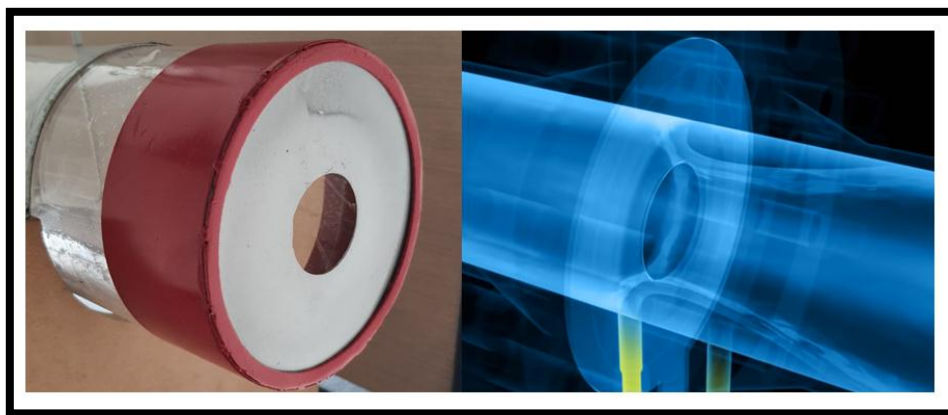
Figura 16. Enderezador de flujo



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

1.3.3.6 Dispositivo de estrangulamiento. Es un dispositivo usado para controlar el punto de operación del ventilador, está ubicado al final del ducto de prueba. Es un elemento que tiene por función obstruir la salida del aire al final del túnel. Como se muestra en la figura 16

Figura 16. Dispositivo de estrangulamiento de flujo

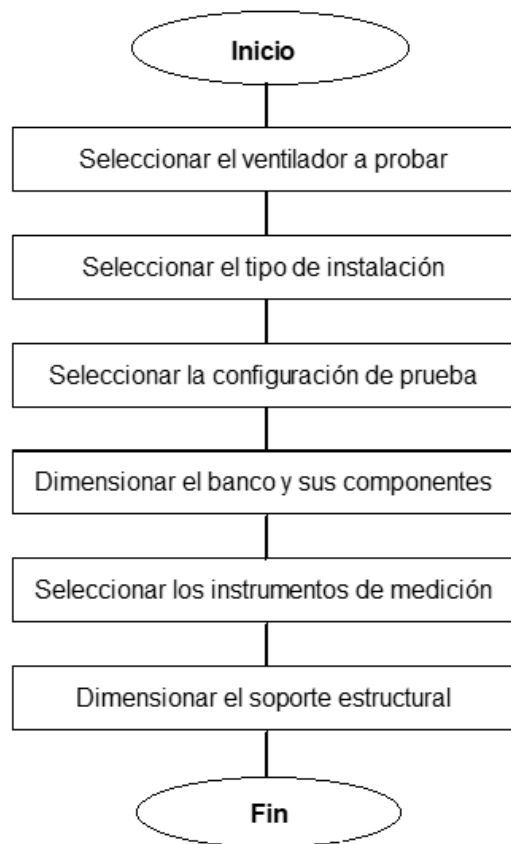


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una interpretación de la norma AMCA 210 “Métodos de prueba de laboratorio de ventiladores para calificación de rendimiento aerodinámico certificado”. Proceso de diseño según la norma AMCA 210 se extrajo el procedimiento de diseño presentado a continuación y se presenta a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Metodología empleada en el diseño del banco de pruebas de ventilador axial



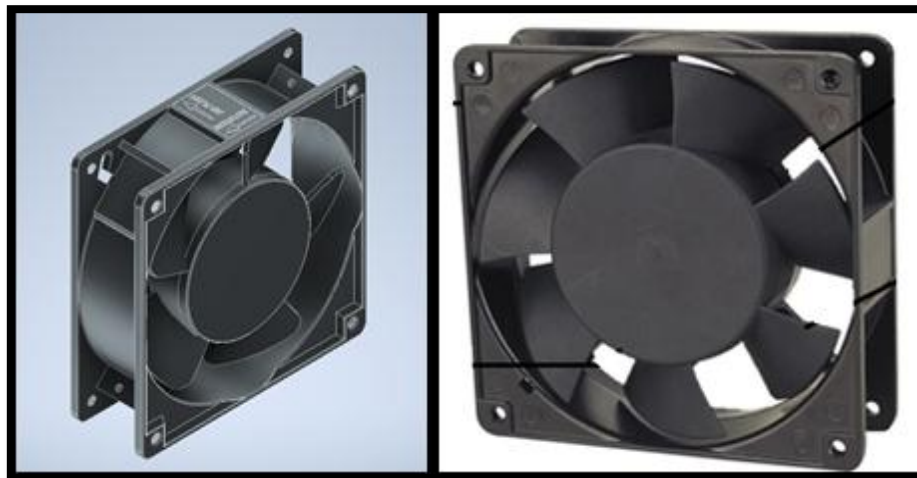
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Se seleccionó un ventilador axial comercial de la marca “Voltio” por su bajo costo alta disponibilidad en el mercado, y principalmente por sus dimensiones proporcionadas para la experimentación. De diámetro interno de 117 mm el ventilador axial se encuentra alojado en una carcasa de marco metálico de aleación de aluminio de tamaño 120x120x38 mm, como se muestra en la figura 17, es resistente a altas temperaturas y retardante de llama, su rodete junto con los 7 alabes que lo componen están hechos de plástico reforzado UL9 4V -0, montados sobre un eje apoyado en rodamientos de bolas con una vida útil de 50,0 00 horas que recibe la potencia de un motor de corriente AC de 0.14 A con voltaje de operación 110v y frecuencia 60 Hz además de incluir protección contra impedancia.. La norma AMCA 210, establece que el aumento de energía interno que puede ser impartido por el ventilador al aire está limitado a 25 kJ / kg. Este límite es equivalente a una presión de 30 kPa (120 in. Wg), el ventilador seleccionado cumple este requerimiento ya que su valor máximo de presión alcanzado es 0.248 kPa (1 in. Wg).

Figura 17. Ventilador de 120 mm

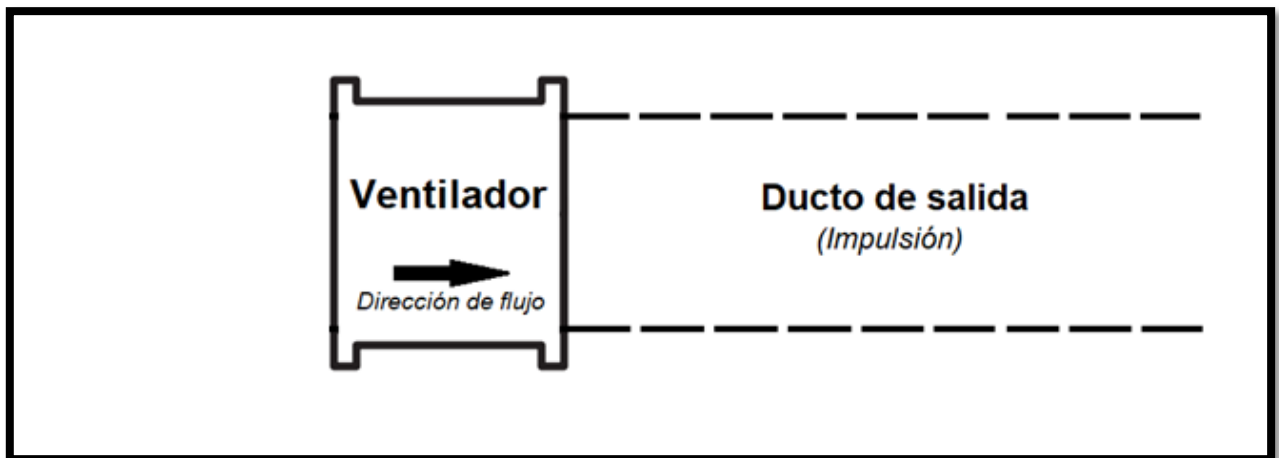


Fuente: elaboración propia, con base en RoHS, compliant. AC axial fan and blower [imagen]. Producto. España; RoHS compliant. 2020. p. 28. [Consultado: 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://static.chipdip.ru/lib/045/DOC003045837.pdf>

3.2 SELECCIÓN TIPO DE INSTALACIÓN

Se seleccionó el tipo de instalación B entrada libre salida en conducto por su utilidad a nivel experimental puesto que permite observar y medir los cambios en las variables que sufre el fluido después de su paso por el ventilador axial, el incremento de su presión o velocidad relacionada directamente con el caudal. Esta instalación al no implementar ducto a la entrada, como se muestra en la figura 18, reduce costos en el proyecto.

Figura 18. Tipo de instalación B seleccionada

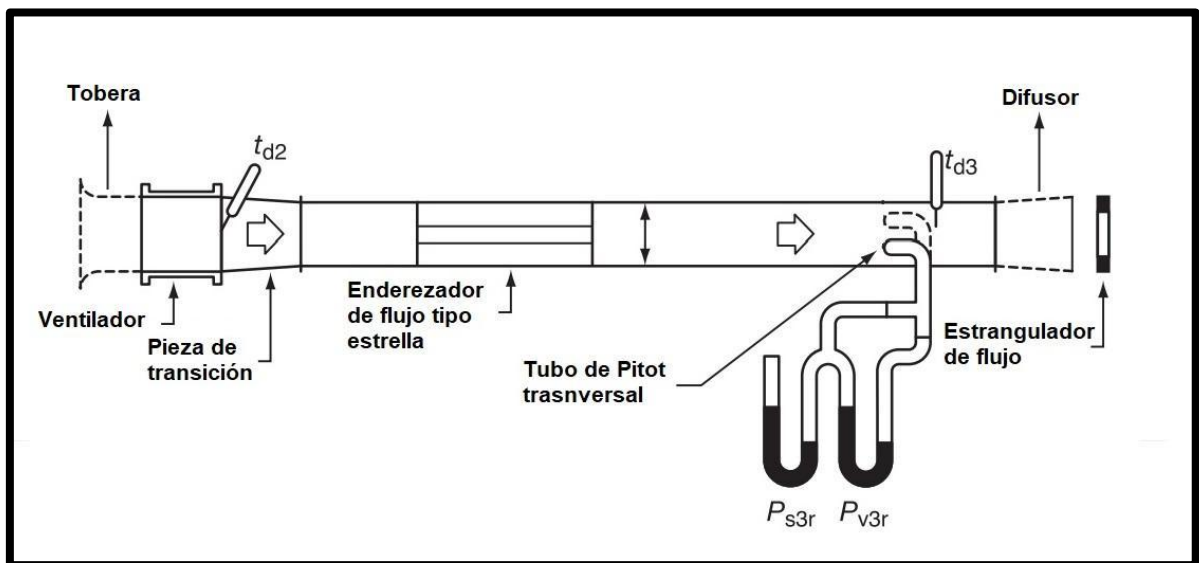


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.3 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE PRUEBA

Se seleccionó la configuración de prueba de tipo Pitot transversal en el ducto de salida con enderezador de flujo tipo estrella debido a que ésta configuración complementa directamente la instalación B salida en ducto seleccionada. La figura 19, muestra el diseño propuesto por la norma, que es la combinación de éstas dos. El tubo de Pitot es un instrumento de medición primario con disponibilidad en el mercado por tanto es un elemento de bajo costo al igual que enderezador de flujo estrella que es de fácil fabricación.

Figura 19. Diseño propuesto por la norma AMCA 210

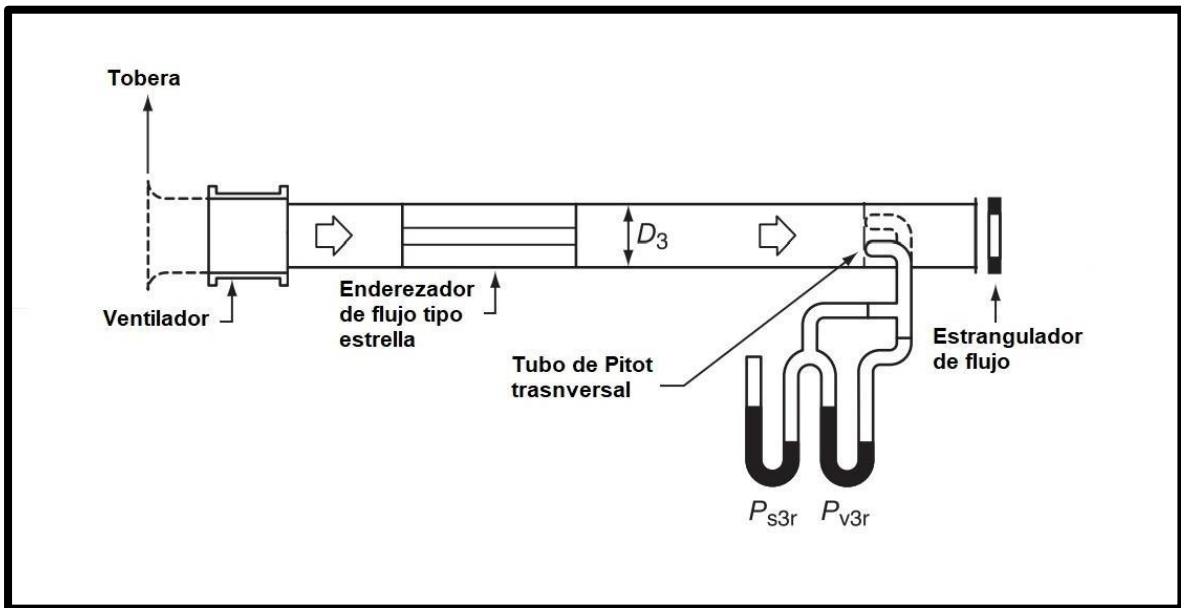


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

El diseño propuesto por la norma incluye tres elementos opcionales que puede ser o no implementados. Siendo la tobera a la entrada, la pieza de transición que conecta el ventilador con el ducto y el difusor a la salida del ducto. Con el objetivo de disminuir costos, se simplificó el diseño propuesto al prescindir del uso de la pieza de transición

junto con el difusor y solo implementar la tobera a la entrada. Para lograrlo, se igualó el diámetro del ducto de pruebas al diámetro interno del ventilador, ya que la pieza de transición tiene como funcionalidad conectar piezas de diferente sección y diferente tamaño, siempre y cuando el ángulo formado ésta no sobrepase los 7.5 grados de inclinación. La eliminación de esta pieza no implica ningún tipo de pérdida en el flujo pues su función es acoplar tamaños y geometrías diferentes de ductos de pruebas al ventilador. Por otro lado, las dimensiones del banco están en función del diámetro interior del ducto de pruebas, con la simplificación de la pieza de transición, el diámetro interno del ducto de prueba es igual al diámetro del ventilador, por tanto, entre mayor sea el diámetro del ventilador, mayores serán las dimensiones del banco de pruebas, el cual, está limitado a un espacio para su ubicación en el laboratorio de la facultad de 2 m de largo; con el diámetro del ventilador seleccionado de 117 mm las dimensiones finales del banco no sobrepasan esta restricción. De igual forma, el difusor a la salida del ducto, no se empleó ya que el ruido producido por funcionamiento del banco es imperceptible, teniendo en cuenta la función del difusor es minimizarlo. Se mantuvo la tobera a la entrada para aumentar la velocidad del aire antes de entrar al ventilador y finalmente, el diseño se simplificó al expuesto en la figura 20.

Figura 20. Simplificación diseño propuesto por la norma AMCA 210

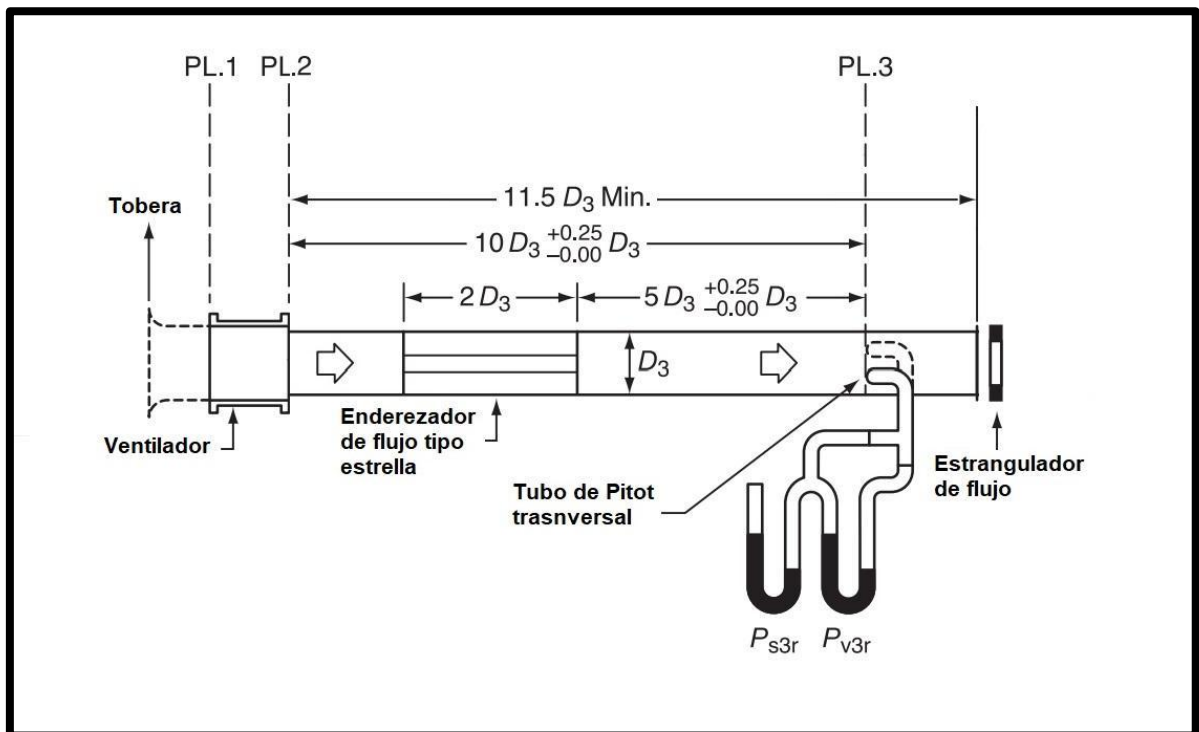


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.4 DIMENSIÓN DEL BANCO Y SUS COMPONENTES

A partir del diseño simplificado, se calcularon las dimensiones del banco de pruebas y cada uno de sus elementos. La norma AMCA 210, de acuerdo al tipo de configuración seleccionado, establece que las dimensiones, tanto del banco como de cada uno de sus componentes, y ubicación respecto al ventilador de cada uno de los componentes del banco, están en función del diámetro del ducto que se acopla al ventilador a probar, como se muestra en la figura 21, donde D_3 es el diámetro del ducto. En el diseño simplificado se estableció que el diámetro interno del ducto es igual al diámetro del ventilador seleccionado de 117 milímetros. Tomando este valor como dato de entrada, se realizaron los cálculos de las dimensiones mediante el uso de un matriz programada en Excel como se muestra en la tabla 3, obteniendo las dimensiones finales de cada componente y su ubicación respecto al ventilador.

Figura 21. Diseño con dimensiones en función del diámetro



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Tabla 3. Cálculos de instalación y configuración del banco

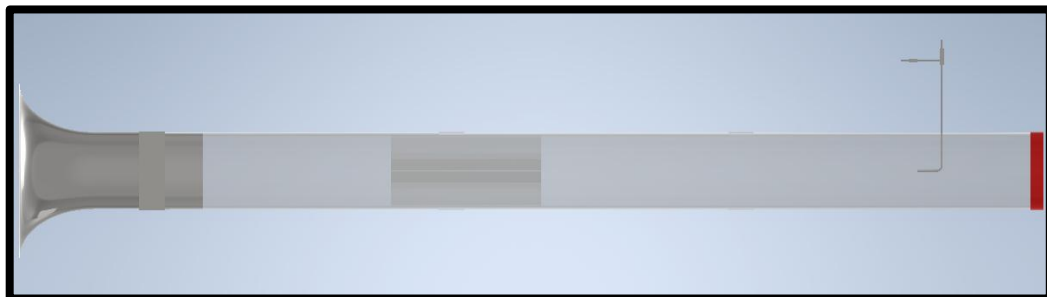
Cálculos de instalación y configuración			
Todas las dimensiones en milímetros (mm)			
DATO DE ENTRADA			
Diámetro del ventilador (D1)	117	Diámetro del ducto	117
DATOS DE SALIDA			
Ducto			
Área de salida del ventilador mm ²	10751,3406	Ubicación plano de medición de tubo de Pitot mm	1170
Diámetro interno de ducto mm	117	Área del ducto 5% (mm ²)	537,56703
Longitud del ducto (L)	1345,5		
Tobera			
Diámetro eje mayor elipse	117	Diámetro eje menor elipse	78,039
Longitud de la garganta	70,2	Diámetro de la garganta	117
Sistema Pitot Estático			
Diámetro mínimo exterior del tubo de Pitot	3,9	Diámetro máximo exterior del tubo de Pitot	2,5
Enderezador de flujo de tipo estrella			
Profundidad del enderezador	234	Diámetro del enderezador	117
Numero de aspas radiales	8	Espaciamiento entre aspas	45°
Ubicación enderezador de flujo desde el plano 2	351		
Planos			

Ubicación PL. 1 (Entrada del ventilador)	Entrada del ventilador	Ubicación PL. 2 (Salida del Ventilador)	Salida del ventilador
Ubicación PL. 3 (Pitot)	1170		

Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

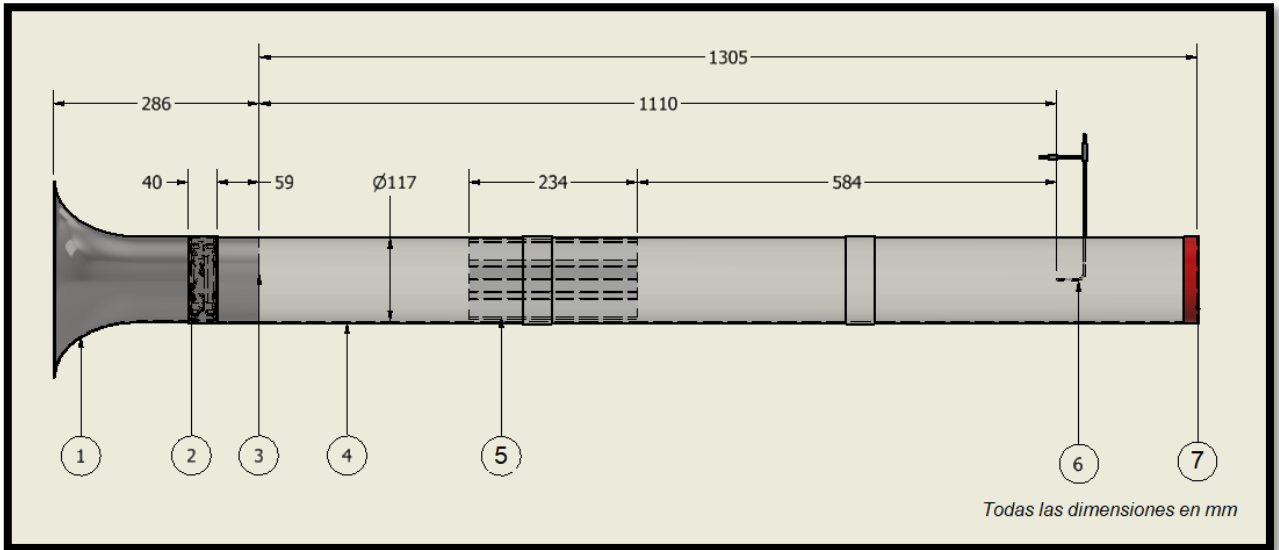
Con las dimensiones obtenidas se modeló el diseño del banco de pruebas en función del diámetro de 117 mm a través del software de modelado CAD Autodesk Inventor 2021 como se muestra en la figura 22 y figura 23 que incluye las dimensiones.

Figura 22. Visto lateral isométrico de la configuración e instalación del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 23. Diseño con dimensiones calculadas en función del diámetro



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

En la tabla 4 se muestran los componentes del banco de pruebas correspondientes a la referencia numérica que se mostró en la figura 22.

Tabla 4. Lista de componentes del banco de prueba

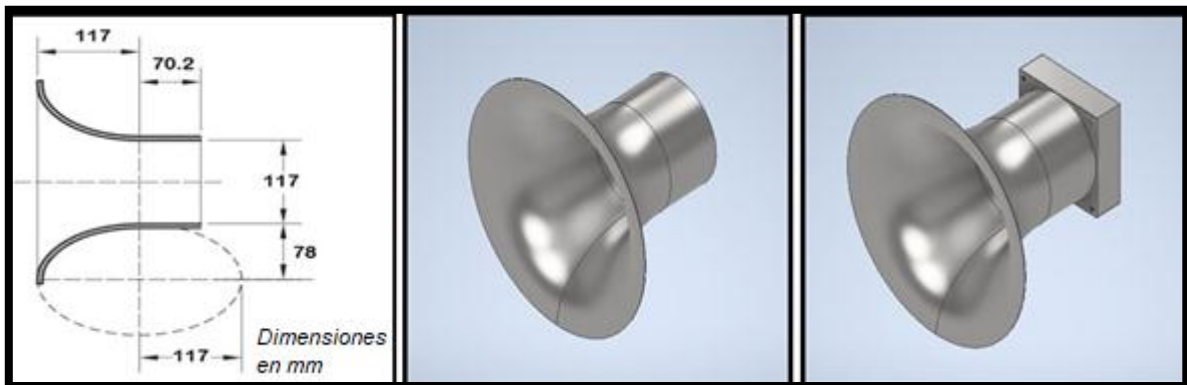
LISTA DE COMPONENTES		
ELEMENTO	CANTIDAD	COMPONENTE
1	1	Tobera
2	1	Ventilador axial
3	1	Acople
4	1	Ducto
5	1	Enderezador de flujo
6	1	Tubo de Pitot
7	1	Estrangulador de flujo

Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.4.1 Componentes del banco. Los componentes del banco de pruebas se encuentran en función al diámetro del ventilador seleccionado, de acuerdo a la norma AMCA. A continuación, se presenta las dimensiones de cada uno de estos de acuerdo a los parámetros establecidos por AMCA junto con la selección de material, el modelo CAD y su construcción final.

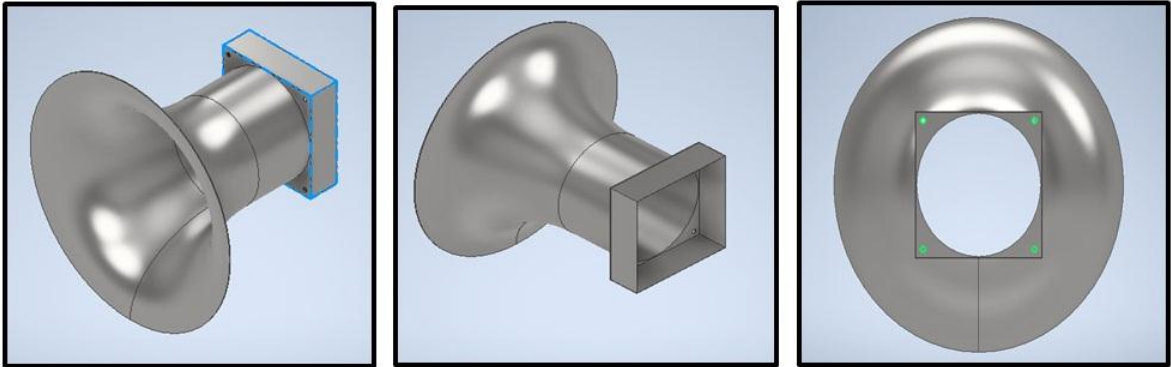
3.4.1.1 Tobera. Se construye a partir de una porción elíptica y una cilíndrica como se muestra en la figura 24. La porción cilíndrica define la garganta de la tobera, la dimensión de la garganta L debe ser $0.6D \pm 0.005D$. La porción elíptica es un cuarto de una elipse, con el eje grande D y el eje pequeño $0.667D$. La superficie de la tobera en la dirección del flujo desde la entrada de la tobera hacia la salida de la tobera debe estar suavemente libre de rebabas, mellas o redondeos. Se fabricó en lámina calibre 18, se masilla la soldadura para suavizar y dejar libre de rebabas. La figura 24 muestra el modelo CAD de la tobera y la 25 la muestra ya construida incluyendo el acople que se expone en el siguiente apartado. La figura 26 muestra la tobera construida y ensamblada.

Figura 24. Tobera dimensiones e isométrico



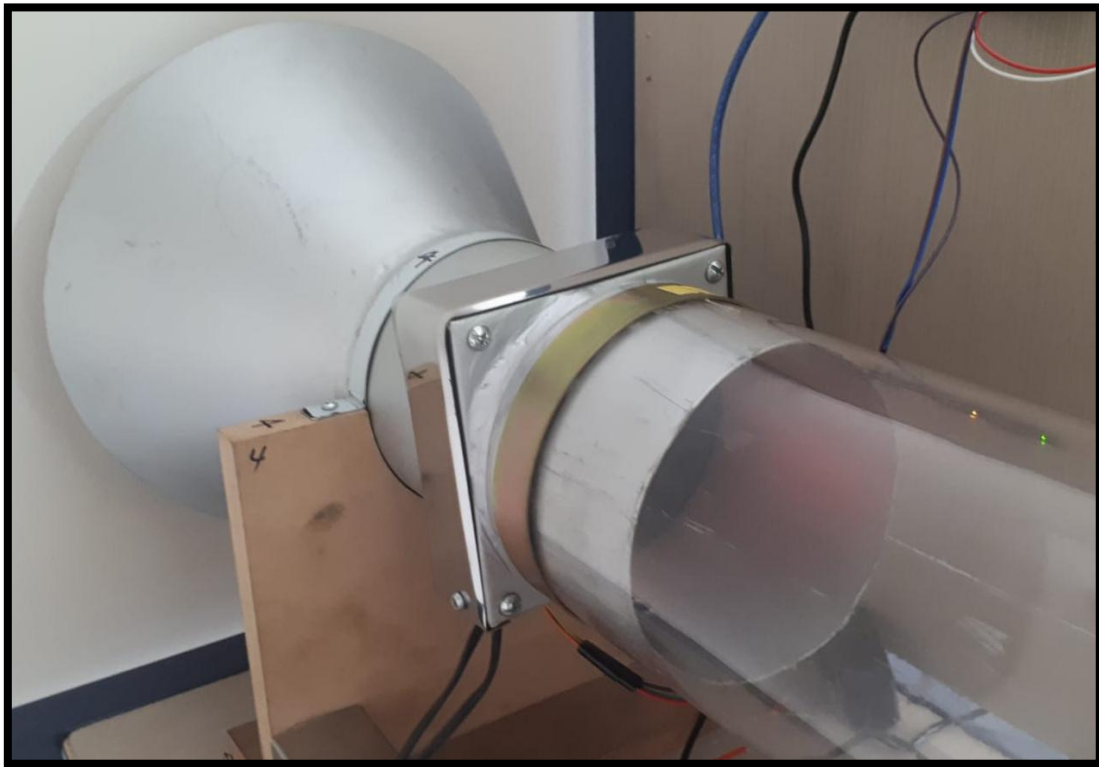
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 25. Acople del ventilador a la tobera



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

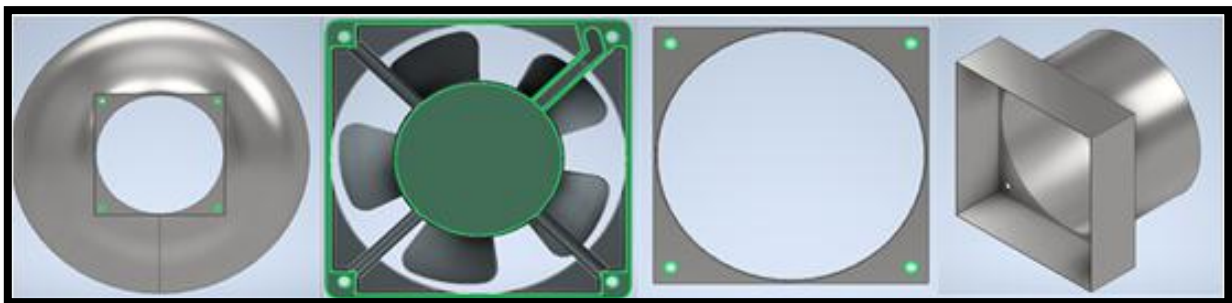
Figura 26. Construcción del acople del ventilador a la tobera



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

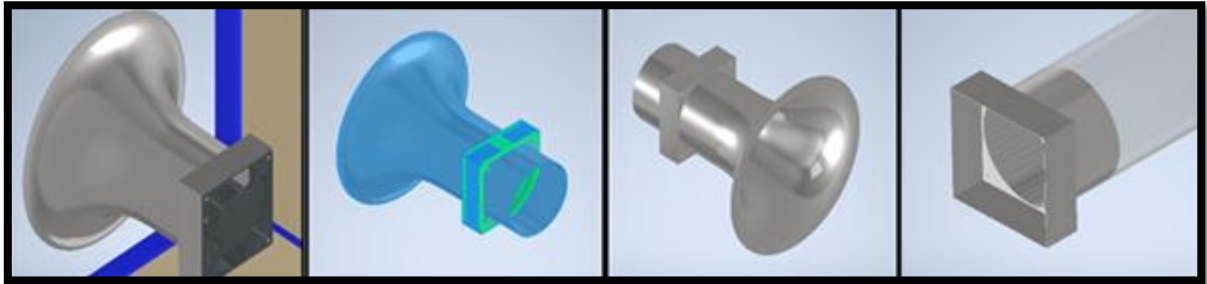
4.4.1.1 Acople del ventilador. A partir de las dimensiones exterior de la carcasa del ventilador 120x120mm se diseña un acople que permita unir la tobera al ventilador y éste al ducto. Como la carcasa del ventilador es de sección cuadrada y tanto la tobera como el ducto de sección circular, se dimensiona el acople para que esté compuesto por un cambio de sección. Como el acople debe conectar tres elementos en el orden de tobera-ventilador-ducto, el acople queda compuesto dos partes. Semejando a una jaula donde el ventilador queda atrapado en el interior, el acople se compone de dos partes. La primera parte, ventilador-tobera, parte de una sección circular y termina en una sección cuadrada, es un cilindro conectado a una caja, la cual se fija directamente a la tobera mediante soldadura. La segunda parte, ventilador-ducto, parte de una sección cuadrada y termina en una sección circular, la cual se introduce en el interior del ducto, siendo removible. Finalmente, el ventilador queda alojado en el interior de la jaula o acople propuesto como se muestra en la figura 28. En la figura 29 se muestra ensamblada y construida. La primera parte cubre el borde de la segunda necesario para mantenerlas sobre el acople. En la parte superior se pone una amarradera de metal para mantenerlas juntas. La carcasa del ventilador junto con las partes de la jaula, cuenta con orificios de sujeción en cuatro puntos, a través de los cuales se aseguró por medio de tornillos con arandelas y tuerca el conjunto formado por la jaula o acoples como indica en la figura 27. Se fabrica en lámina calibre 18.

Figura 27. Perforaciones que permiten la sujeción del acople



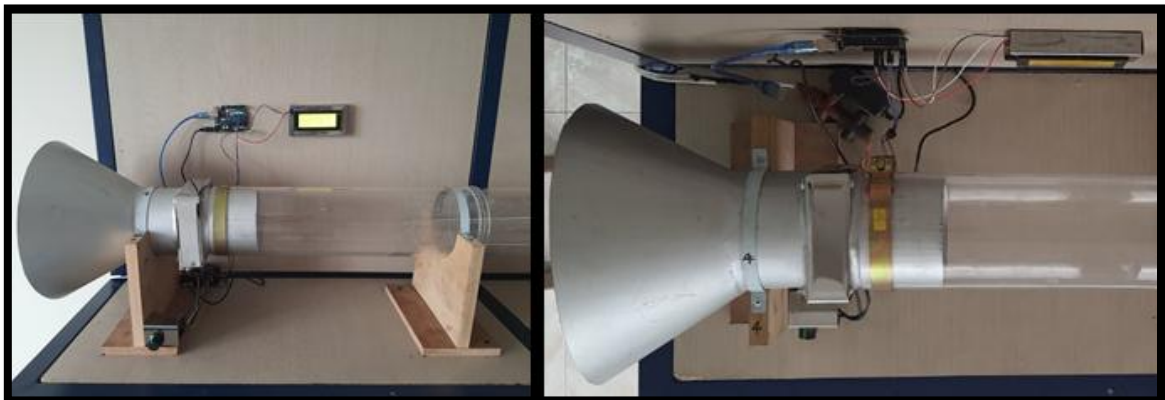
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 28. Isométrico del acople ensamblado



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 29. Construcción y ensamble del acople



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

4.4.1.2 Ducto. Para mejorar la experiencia didáctica en la enseñanza se elige un material para el ducto que sea transparente y permita en futuras ampliaciones de los servicios del banco, mediante un agregado en el aire observar el comportamiento del aire después de su paso por el ventilador. Se realizó una matriz de selección que se muestra la tabla 5 para elegir el material del ducto teniendo como principal factor decisivo la transparencia del material. El ducto se dimensiona de acuerdo a los indicado por la norma, esto es un diámetro interno de 117 mm que coincide con el diámetro interior del ventilador y se fabrica en un material transparente esto para mejorar su

carácter didáctico y permitir a los estudiantes visualizar el flujo transformado cuando pasa de turbulento a laminar por medio del enderezador de flujo. Se seleccionan un ducto circular y no cuadrado porque el circular se acopla directamente a la forma circular del ventilador y de igual modo, por las pérdidas de energía que presentes en una sección cuadrada, como los vórtices generados en los planos constitutivos de la sección rectangular. Con la selección de la sección circular, por tanto, se evita usar la pieza de transición ya que el ventilador se acopla directo al ducto a través del acople diseñado.

Tabla 5. Matriz de selección de material del ducto

Matriz de selección material del ducto

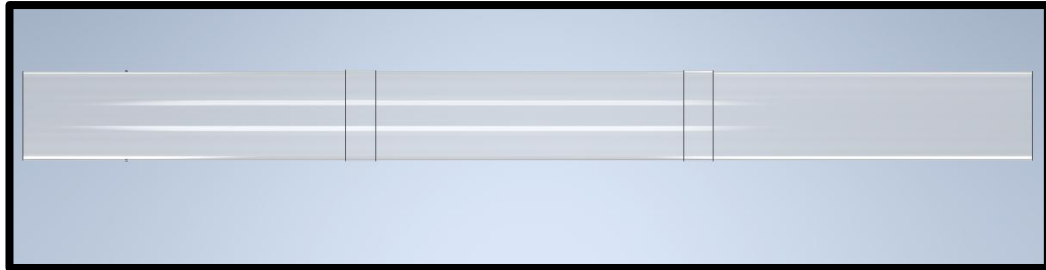
Alternativa	Criterio				Total
	Transparencia	Resistencia mecánica	Factibilidad	Costo	
Acrílico	4	4	4	3	3,75
Metal	1	5	3	5	3,5
PVC	1	5	2	4	3
Plástico PET	4	4	2	2	3
Vidrio	5	1	1	1	2

1	Baja
5	Alta

De la anterior se selecciona el acrílico ya que tiene buena resistencia mecánica y transparencia. El diámetro interno del ducto es igual al diámetro del ventilador por la simplificación realizada. La construcción del ducto es material de acrílico de 3 mm de espesor construido por la unión de tres partes de 450 unidos con cloruro de metileno con una costura cada uno. Se incorpora un ducto de sección transversal circular con longitud de 1350 mm, diámetro interior de 117mm y exterior de 120mm, esto es un diámetro y diez diámetros del ventilador, respectivamente. El modelo CAD del ducto con estas dimensiones se muestra en la figura 30 y 31. Debido al tamaño de los ventiladores comerciales, el diámetro interno del ducto se determinó a partir del

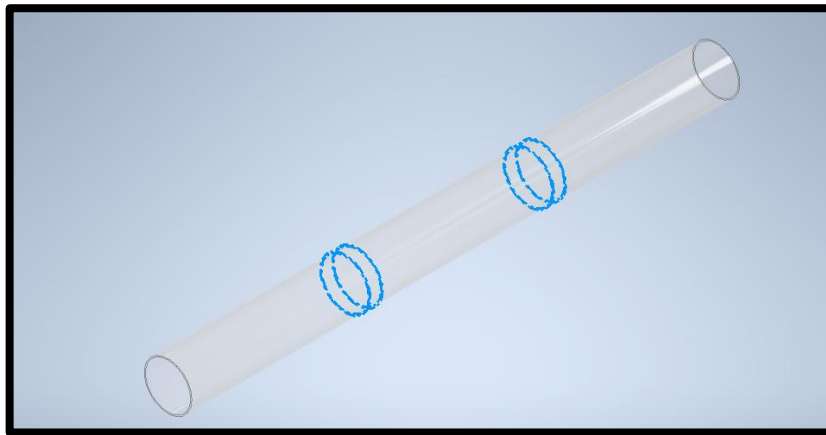
diámetro del ventilador para de esta manera acoplar directamente el ducto al ventilador a través del acople respectivo.

Figura 30. Vista lateral ducto.



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 31. Vista isométrica del ducto



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

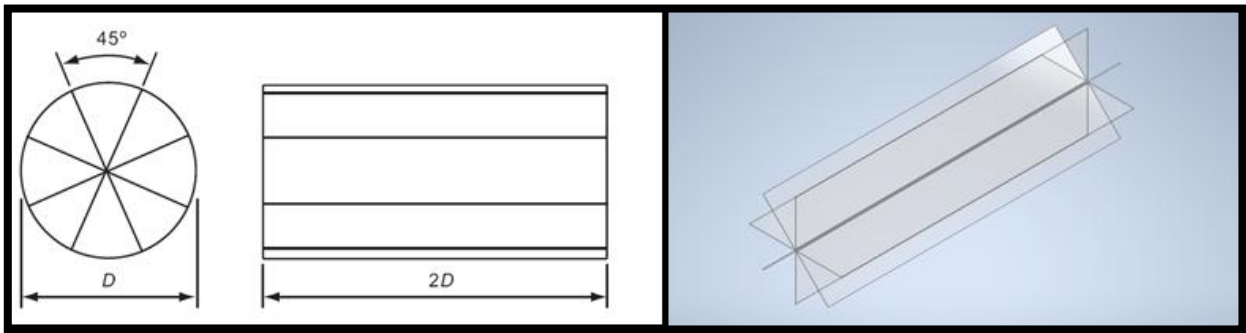
4.4.1.3 Enderezador de flujo. Este se fabricó en acrílico de 1 mm de espesor. Por su bajo costo y fácil de adherir al acrílico por eso se eligió que fuera del mismo material del ducto, este se construyó dentro del ducto. Frente a madera o teflón. Teflón requería un molde para fabricarlo fundido, incrementa costos por lo que se descartó. De las dos

configuraciones de enderezador que ofrece la norma entre estrella y panal de abejas se eligió el tipo estrella por ser más barato y fácil de fabricar.

El enderezador de flujo de aire tiene como función eliminar la componente radial en la velocidad absoluta de las líneas de flujo que estas adquieren a su paso por el ventilador axial, además de garantizar que el comportamiento del flujo sea laminar y paralelo al eje del ducto a su llegada al plano de medición plano. Enderezador de flujo tipo estrella porque es indispensable para obtener un flujo estable al eliminar la componente tangencial y el flujo requerido es radial para la estación de medición.

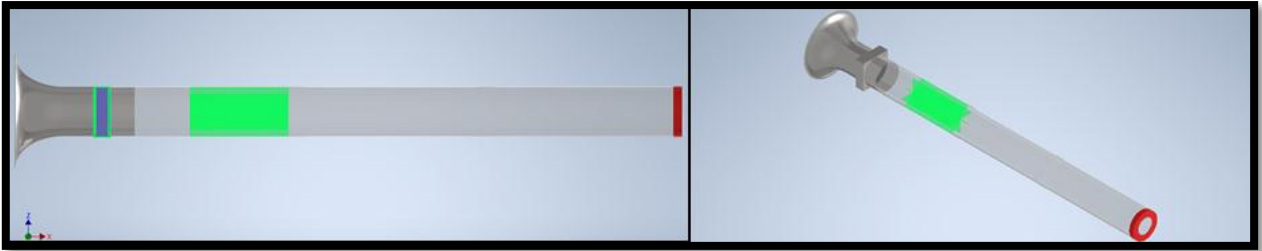
El enderezador en estrella está construido con ocho láminas radiales de longitud igual a $2D$ con una tolerancia de $\pm 1\%$ y de espesor no mayor que $0.007D$. Las cuchillas estarán dispuestas para ser equidistantes en la circunferencia con la desviación angular no es mayor que 5° entre placas adyacentes. La forma del enderezador del flujo de aire será como especificado en la Figura 32.

Figura 32. Plano y vista isométrica del enderezador de flujo



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 33. Ubicación del enderezador de flujo dentro de la configuración del banco



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 34. Enderezador de flujo al interior del ducto



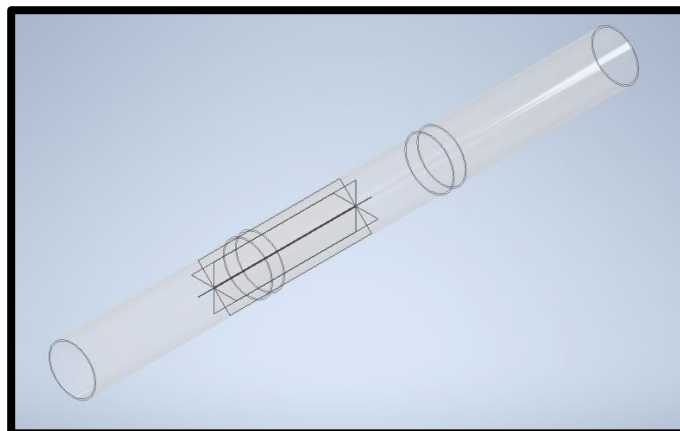
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 35. Construcción y ensamble del enderezador de flujo



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

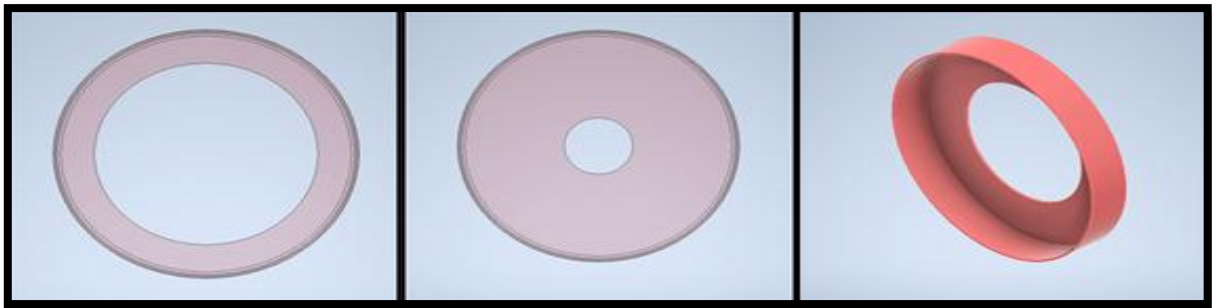
Figura 36. Vista isométrica del enderezador de flujo dentro del ducto



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

4.4.1.4 Estrangulador de flujo. Se diseñó un estrangulador de flujo como se muestra en la figura 1, compuesto por una matriz la cual está compuesta un cilindro y un círculo formando 90 grados, se soldó y se enmasillo. Dentro de esta matriz se intercambian los anillos de diferentes áreas los cuales están en función del área producida por un diámetro de 117mm, a partir de esta se toman los porcentajes disminuyendo de a 10 % hasta que se llega a un área 0 como se muestra en la tabla 6. Los anillos son concéntricos respecto al eje del ducto como se muestra en la figura 38 y fueron fabricados en lámina calibre 18 al igual que la matriz como se muestra en la figura 39.

Figura 37. Modelo CAD del estrangulador de flujo



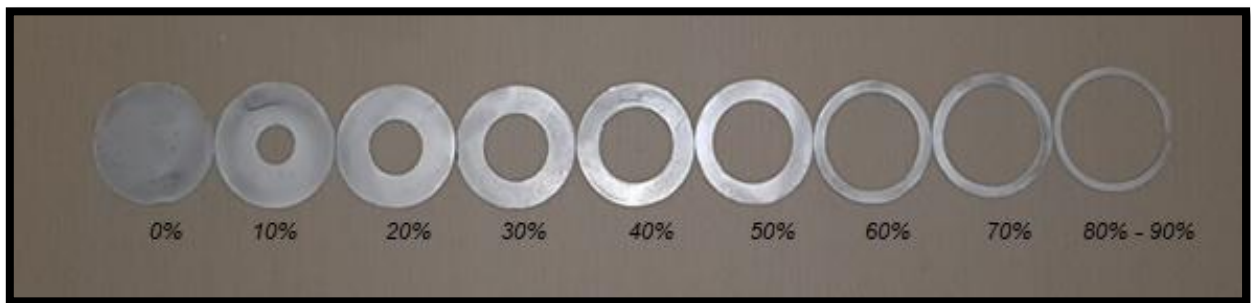
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Tabla 6. Cálculos estrangulador de flujo

Cálculo estrangulador de flujo						
Radio ducto (mm)	58,5		Área ducto (mm ²)		10751,31322	
Valor de Pi	3,141592		Diámetro ducto (mm)		117	
Porcentaje	Área (mm ²)	Equivalencia (cm ²)	Radio (mm)	Diámetro (mm)	Aprox. (mm)	Equivalencia (cm)
0	0	0	0	0	0	0
10	1075,131	10,75	18,49932	36,99865	37	1,84
20	2150,263	21,5	26,162	52,32399	52,3	2,61
30	3225,394	32,25	32,04177	64,08354	64	3,2
40	4300,525	43	36,99865	73,9973	74	3,69
50	5375,657	53,75	41,36575	82,73149	82,7	4,13
60	6450,788	64,5	45,31391	90,62781	90,6	4,53
70	7525,919	75,25	48,94461	97,88922	97,9	4,89
80	8601,051	86	52,32399	104,648	104,6	5,23
90	9676,182	96,75	55,49797	110,9959	111	5,54
100	10751,31	107,5	58,5	117	117	5,85

Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 38. Anillos intercambiables del estrangulador de flujo



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 39. Matriz que soporta los anillos del estrangulador de flujo instalado



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.5 SELECCIONAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

3.5.1 Manómetro diferencial de columna líquida. Se seleccionó un manómetro de columna de líquido inclinado-vertical por su alta sensibilidad a presiones bajas además de que la norma sugiere este elemento y es el más usado en los proyectos que se investigaron en los antecedentes. Se selecciona este tipo de manómetro análogo ya que son más económicos que los digitales.

Se seleccionó un manómetro diferencial de columna líquida de la marca Dwyer de referencia II Mark 25 porque esta referencia es de tipo inclinado-vertical. El tubo curvo inclinado-vertical ofrece rangos más altos de medida con incrementos más fáciles de leer en lecturas bajas como el ventilador usado aquí produce valores de presión bajos. El manómetro incluye dos conectores para tubería de 1/8" (3.2 mm), botella de 1 oz (28 ml) de líquido indicador, incluye 8' (2.4 m) de tubería de plástico flexible de doble columna, tornillo de nivelación para el funcionamiento portátil. Se escoge porque la norma Dwyer desarrolla todos sus productos con base en los parámetros de AMCA.

Figura 40. Manómetro seleccionado



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.5.2 Tubo de Pitot. El tubo de Pitot utilizado junto de la marca Dwyer serie 167 referencia número 6 es un tubo de Pitot estático que toma la medida de tanto de presión estática como de presión total gracias a las cuales se obtiene el valor de la presión de velocidad. Se selecciona tubo de Pitot porque es barato, de fácil uso y porque permite explicar el concepto de presión total. El tubo Pitot estático en L de acero inoxidable modelo 167-6 series 160 de la marca Dwyer, se selecciona porque fue diseñados para cumplir con la norma AMCA 210- 99 o sus equivalentes. Se escoge porque es la forma más fácil y económica de medir flujo además que permite usar un elemento de medición básico. De acuerdo a la norma AMCA 210 las dimensiones del tubo de Pitot deben estar en función del diámetro interno del ducto de pruebas este es 117mm. La norma indica que el diámetro de vástago del tubo de Pitot debe estar en el rango de 2.5 mm y $1/30$ del diámetro del ducto de prueba esto son 3,9 mm. El tubo serie 167 – 6 es de 3.175 mm ($1/8$ ") de diámetro por lo que cumple con lo solicitado con la norma, está dentro del rango requerido, siendo ese el criterio de selección. Las demás dimensiones del tubo son: 152.4 mm (6") de longitud de inserción, punta de 38.1 mm de $1-1/2$ ". Acabado superficial de 0,8 micrómetros. Con clasificación de 815.5° C. costa de 8 agujeros igualmente espaciados de 0,51 mm de diámetro, no puede exceder 1 mm y de diámetro de profundidad de 0.5 mm del orificio. Libre de muescas y rebabas porque las conexiones soldadas en plata para operación a prueba de fugas. No necesita calibración debido al diseño de la punta ASHRAE. En la figura 40 y 42 se presenta el tubo de Pitot seleccionado junto con sus dimensiones y en las figuras 43 a 45 se presenta el ensamble final en el plano de medición a la salida del ducto. Se

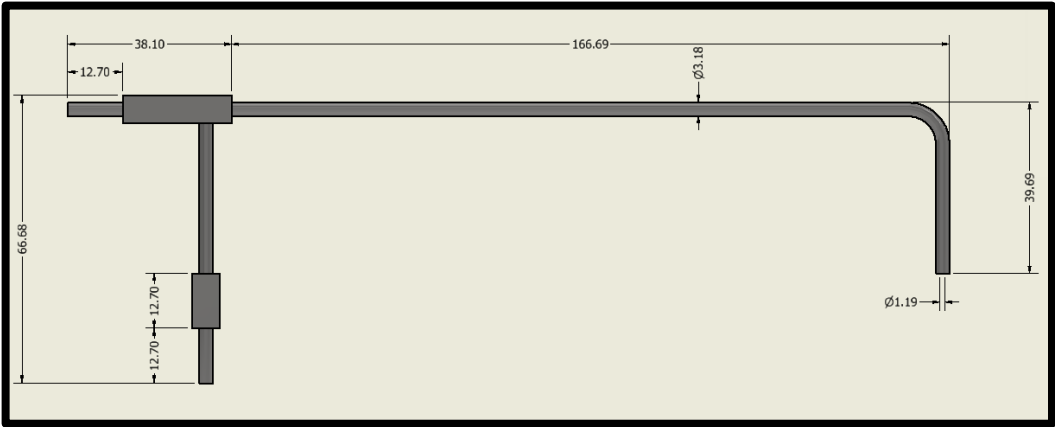
muestra el tubo de Pitot insertado en el ducto en su extremo de tomas, que censan los valores y se transmiten al manómetro diferencial.

Figura 41. Isométrico tubo de Pitot



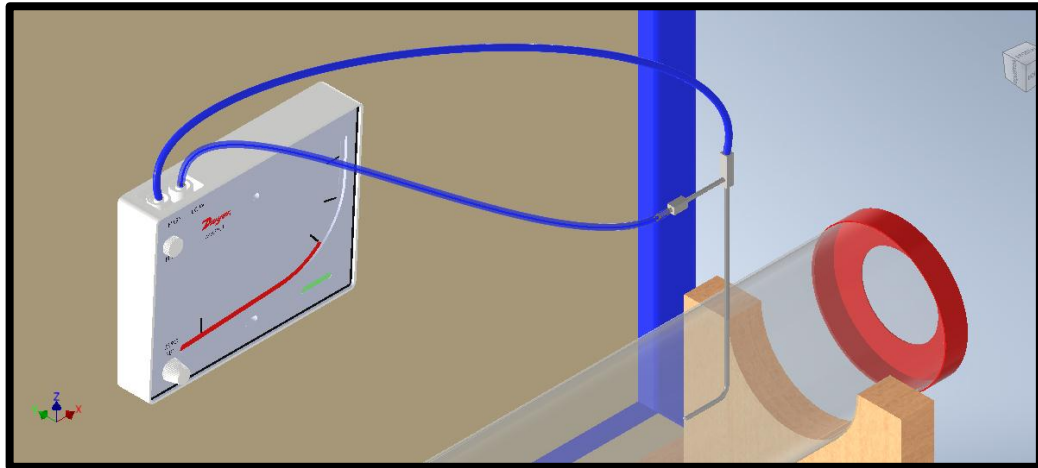
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 42. Plano tubo de Pitot



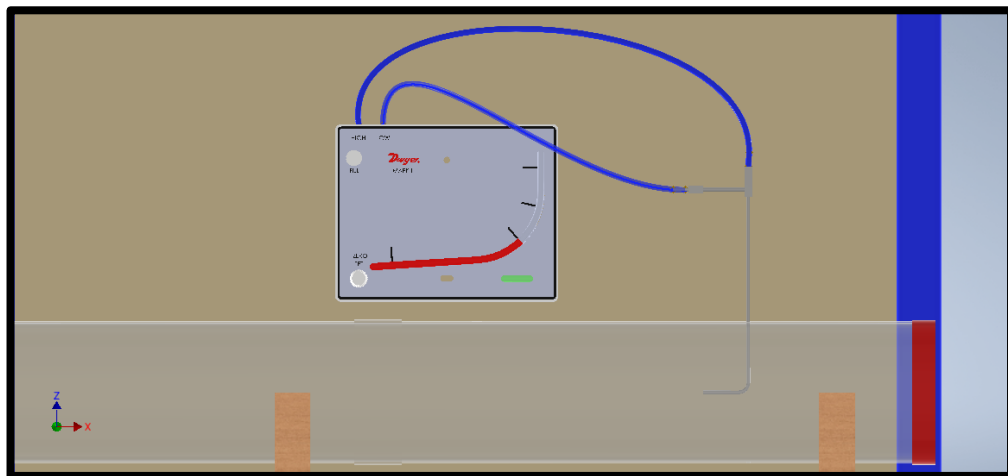
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 43. Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro



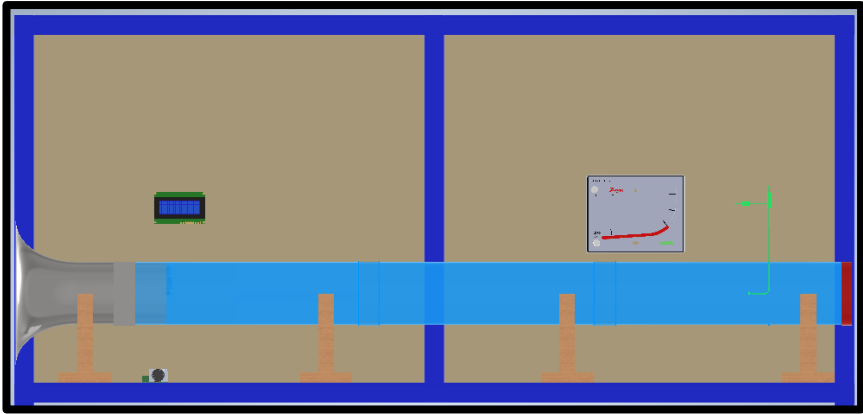
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 44. Vista lateral tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro



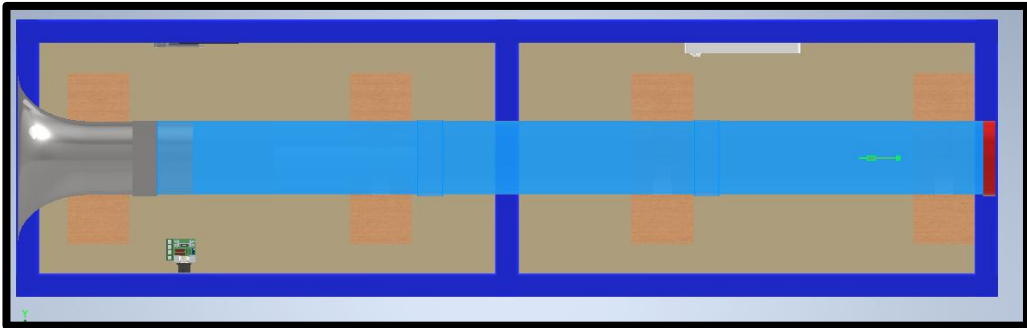
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 45. Vista lateral Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 46. Vista de techo Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro



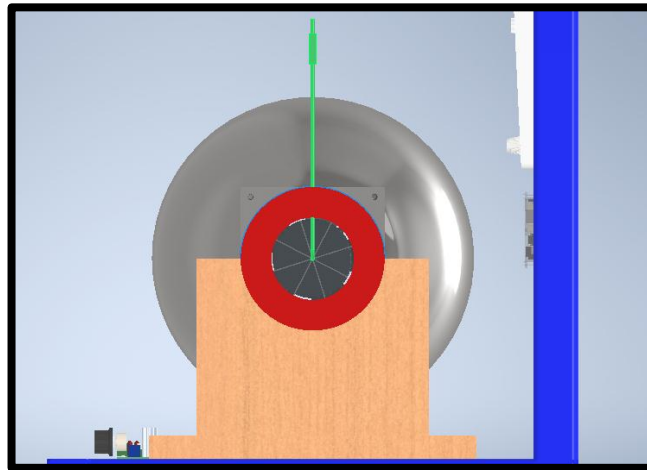
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

3.5.3 Medición de velocidad de rotación. Se hizo a través del uso del microcontrolador Arduino en conjunto con la pantalla LCD que muestra las revoluciones leídas por el sensor de efecto hall ubicado en el ventilador. Un imán ubicado en el alabe a medida que va rotando interrumpe el campo magnético estable del sensor y por tanto marca un giro.

3.6 DIMENSIONAMIENTO DEL SOPORTE ESTRUCTURAL

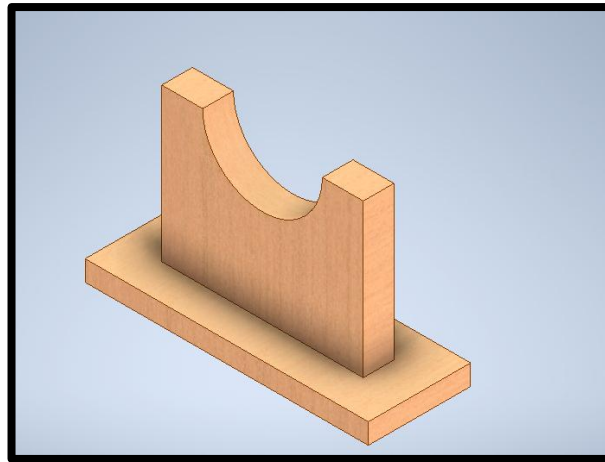
3.6.1 Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas

Figura 47. Vista trasera Tubo de Pitot ensamblado en el ducto y conectado al manómetro



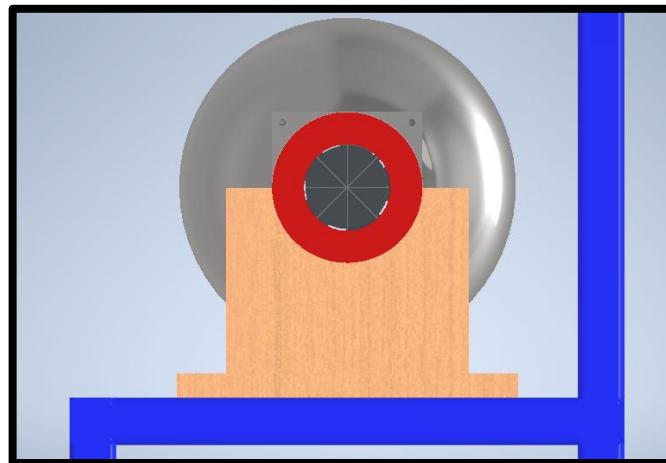
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 48. Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas



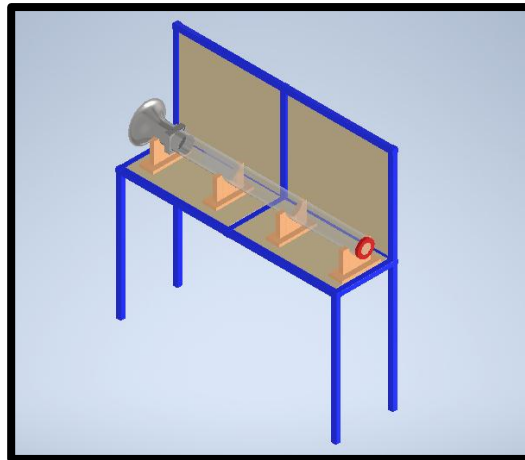
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Vista trasera Base de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas



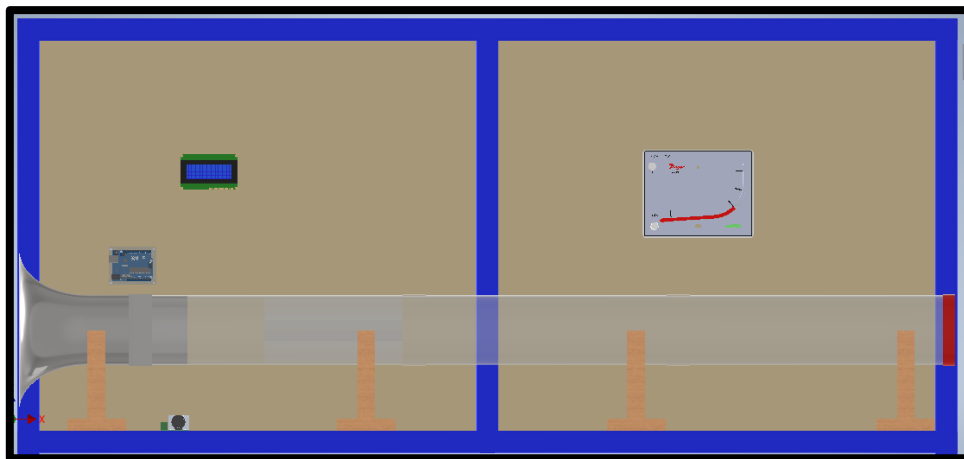
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Ensamble de las bases de acople del ducto con la estructura de soporte del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

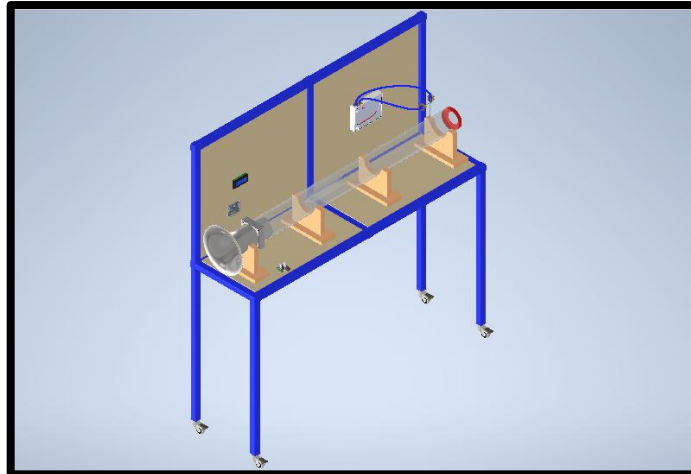
Figura 51. Vista frontal del ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

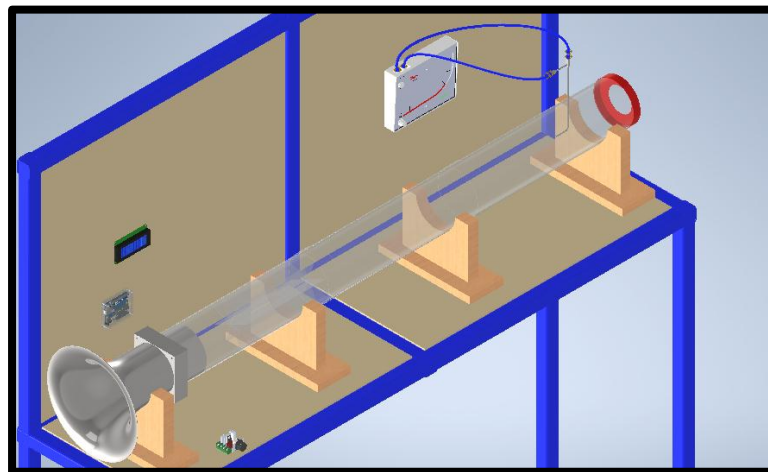
3.6.2 Soporte estructural del banco de pruebas. Estructura del banco con ruedas y elementos de sujeción junto con las bases de madera.

Figura 52. Ensamble final del banco de pruebas



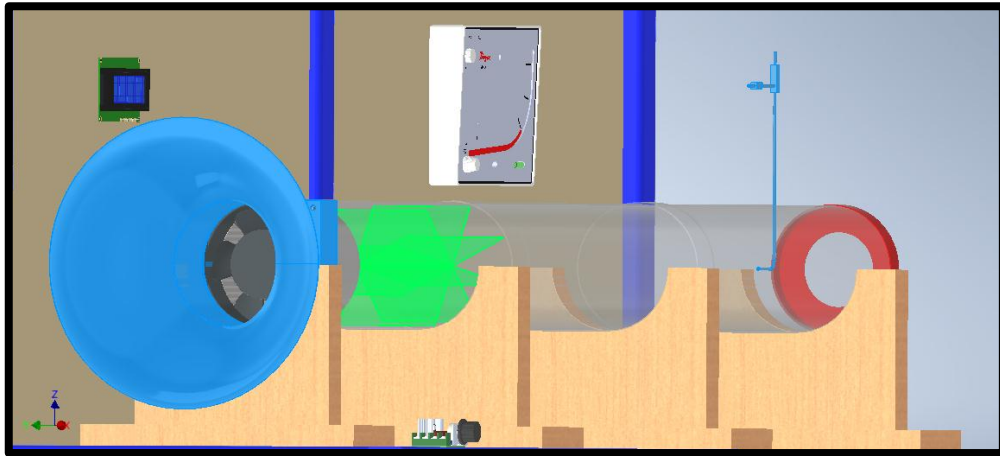
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 53. Ensamble final del banco de pruebas



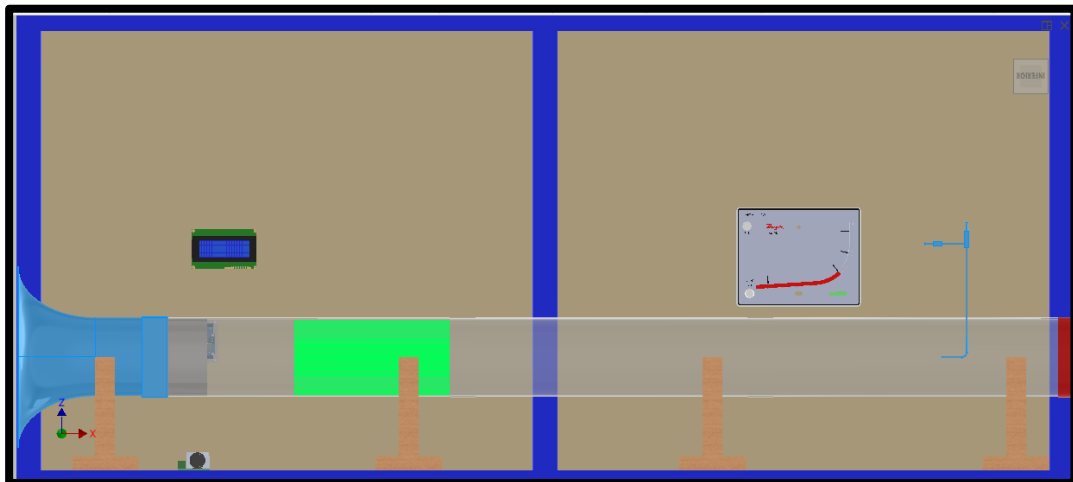
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 54. Modelo CAD ensamblado final del banco de pruebas



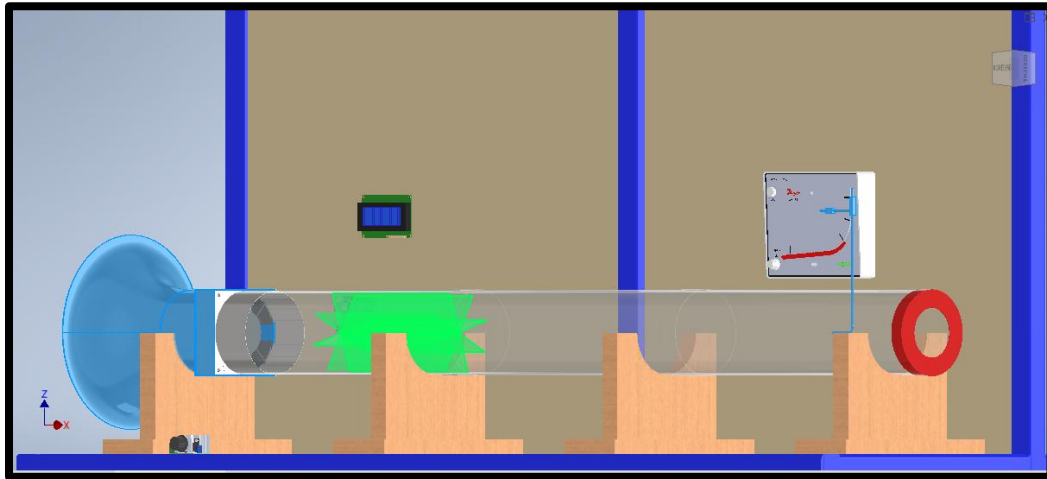
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 55. Vista lateral ensamblado final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 56. Vista lateral CAD ensamble final del banco de pruebas

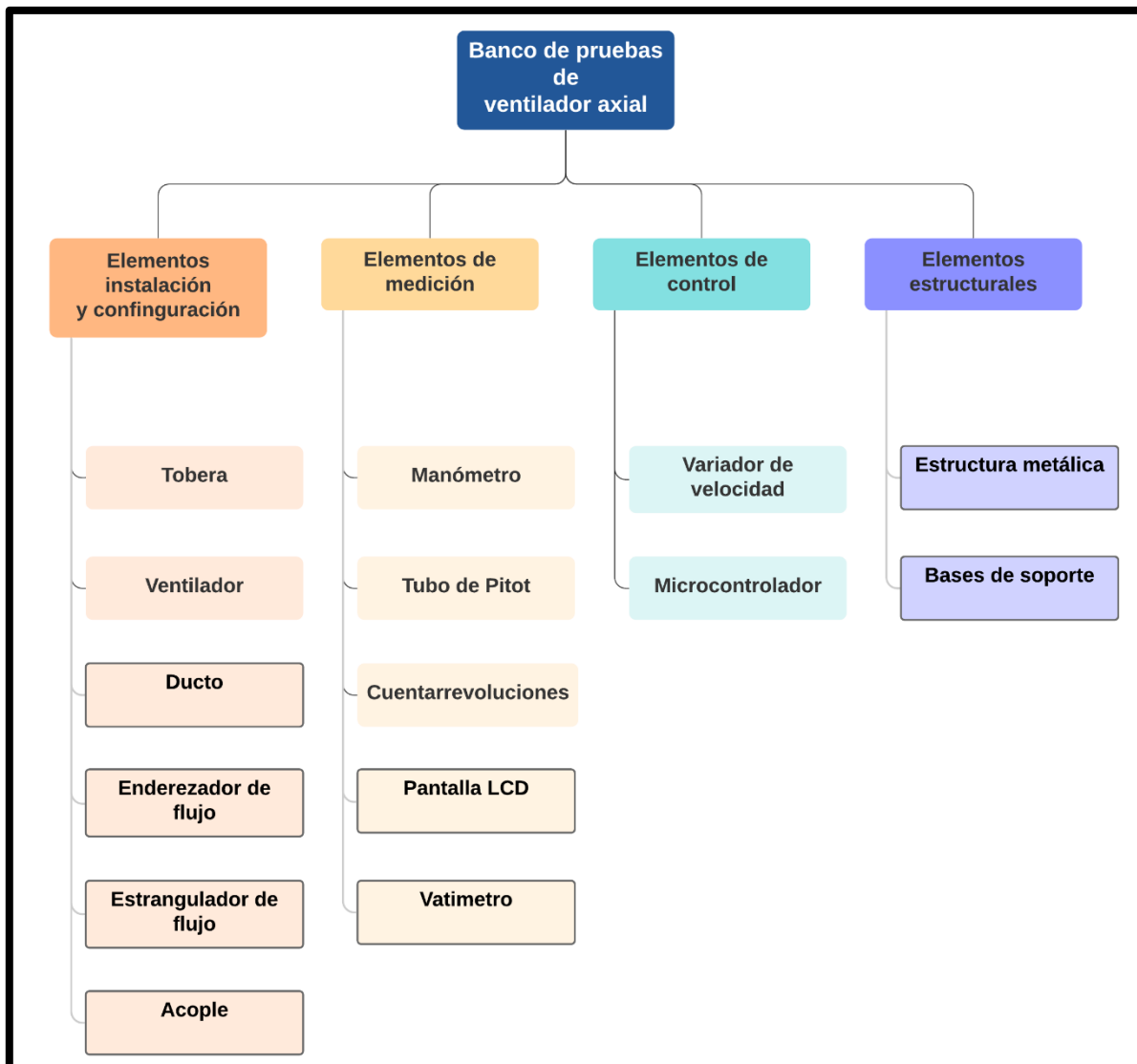


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

4. RESULTADOS

La tabla 7 muestra los componentes clasificados de acuerdo a su función dentro del banco de pruebas de Ventilador axial.

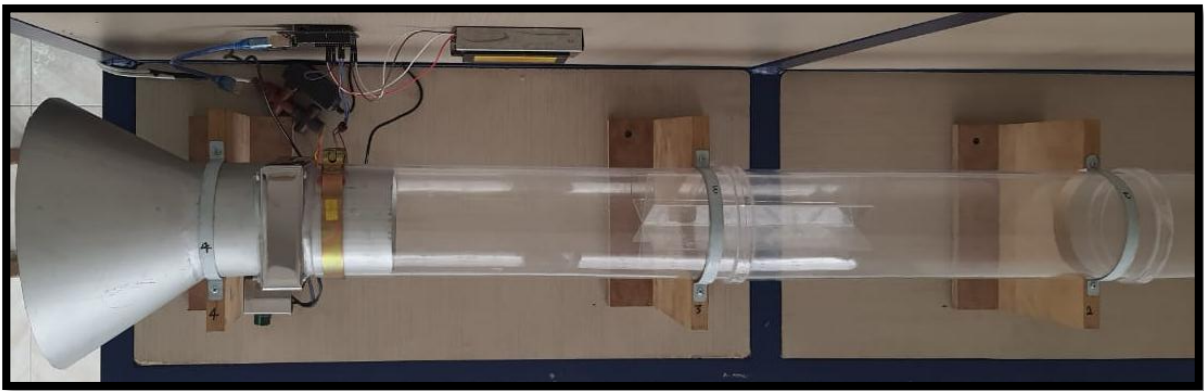
Tabla 7. Componentes finales del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

A continuación, desde la figura 57 a figura 65, se presentan múltiples vistas del banco de pruebas de ventilador axial finalizado y listo para su puesta en marcha al servicio de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica y en general las personas que deseen hacer uso del mismo. En el anexo A, se explica detalladamente a través del manual de uso, mantenimiento y guía de laboratorio para práctica experimental del banco de pruebas de ventilador axial para los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja el proceso que se debe llevar a cabo para usar asertivamente el banco, así como los cuidados que se debe tener con el mismo.

Figura 57. Vista de techo ensamble final



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

En el axeno B se muestra los planos de detalle empleados en la construcción del banco obtenidos a través de Autodesk Inventor. En el anexo C se expone el costo final de proyecto y finalmente, en los anexos D y E se adjunta la documentación técnica correspondiente al manómetro diferencial y el tubo de Pitot empleado.

Figura 58. Vista posterior construcción y ensamble final del banco de pruebas



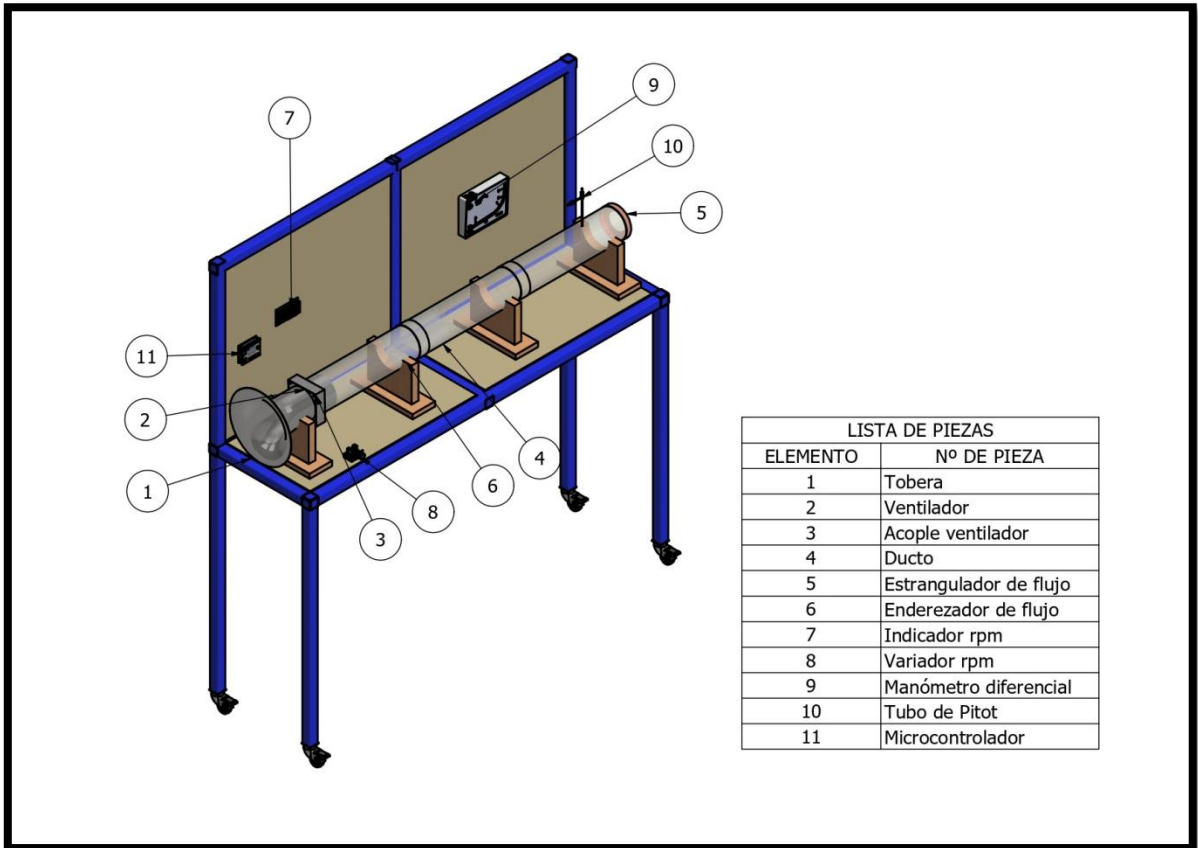
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 59. Vista lateral construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 60. Modelo CAD y piezas principales del ensamble final



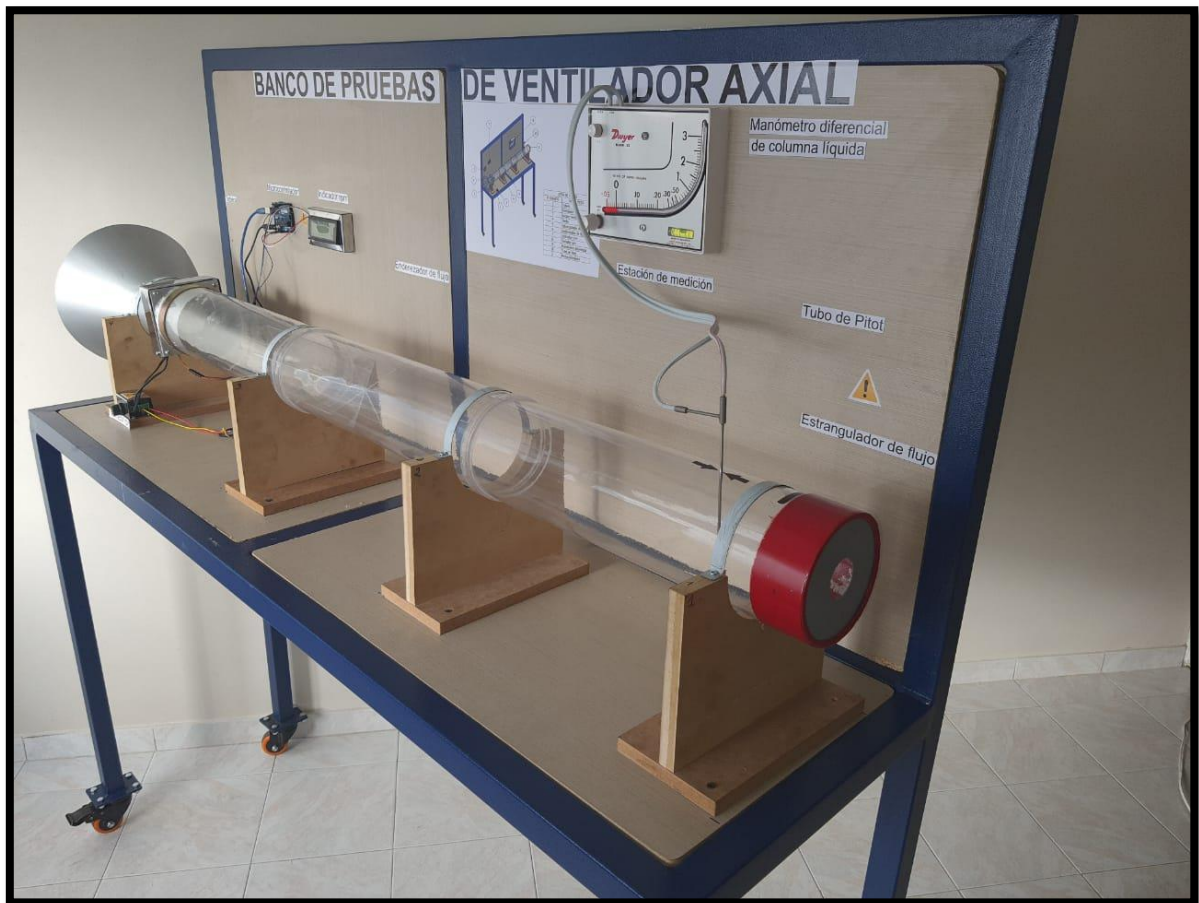
Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 61. Vista frontal construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 62. Vista posterior construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 63. Vista frontal- techo construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 64. Vista lateral configuración construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 65. Vista lateral construcción y ensamble final del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

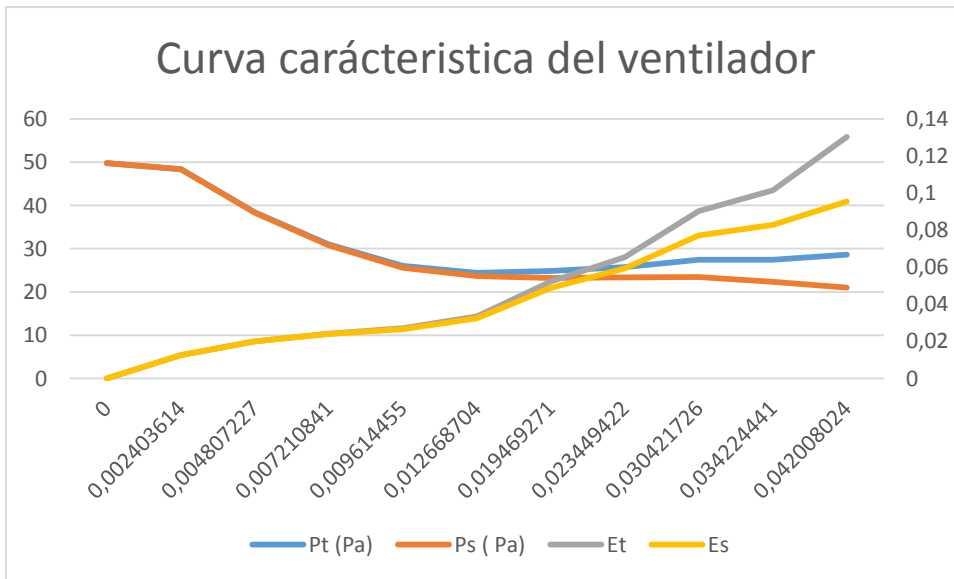
La curva característica del ventilador axial que fue obtenida se obtuvo a partir de la medición de la presión a una distancia de 1100 mm de la salida del ventilador. El valor máximo de presión estática fue de 49.7 Pa (0.20 inwg) cuando el estrangulador de flujo obstruyó el flujo completamente con el anillo 0 en la matriz. El valor mínimo de presión obtenido fue 4 Pa cuando el estrangulador no uso anillo dentro de la matriz lo que permitió que el flujo fuera el máximo.

Tabla 8. Valores obtenidos de la prueba en SI

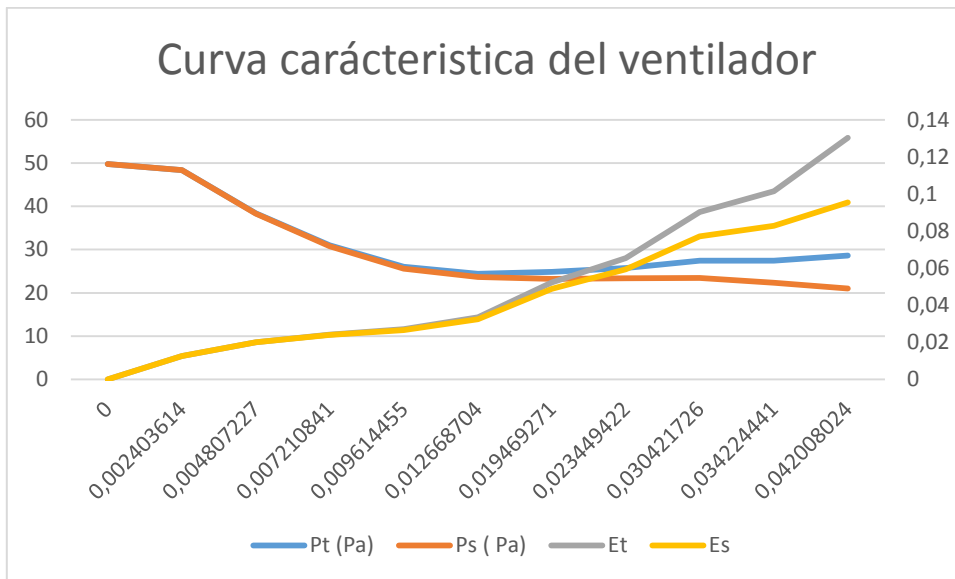
Caudal Q (m3/s)	Presión total del ventilador Pt (Pa)	Presión estática del ventilador (Pa)	Eficiencia total del ventilador	Eficiencia estática del ventilador
0	49,8	49,8	0	0
0,00240361	48,4029736	48,3779736	0,01259113	0,01258463
0,00480723	38,4029736	38,3029736	0,01997963	0,01992761
0,00721084	31,0029736	30,7779736	0,02419454	0,02401895
0,00961445	26,0029736	25,6029736	0,02705675	0,02664054
0,0126687	24,3781628	23,6836583	0,03342421	0,032472
0,01946927	24,8419051	23,2016551	0,05234348	0,04888737
0,02344942	25,7450936	23,3656527	0,06533632	0,05929773
0,03042173	27,4170476	23,4122704	0,09026774	0,07708243
0,03422444	27,4170476	22,3485014	0,10155121	0,08277759
0,04200802	28,6417336	21,0055711	0,13021457	0,09549811

Fuente: elaboración propia

Figura 66. Curva característica del ventilador sistema internacional



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.



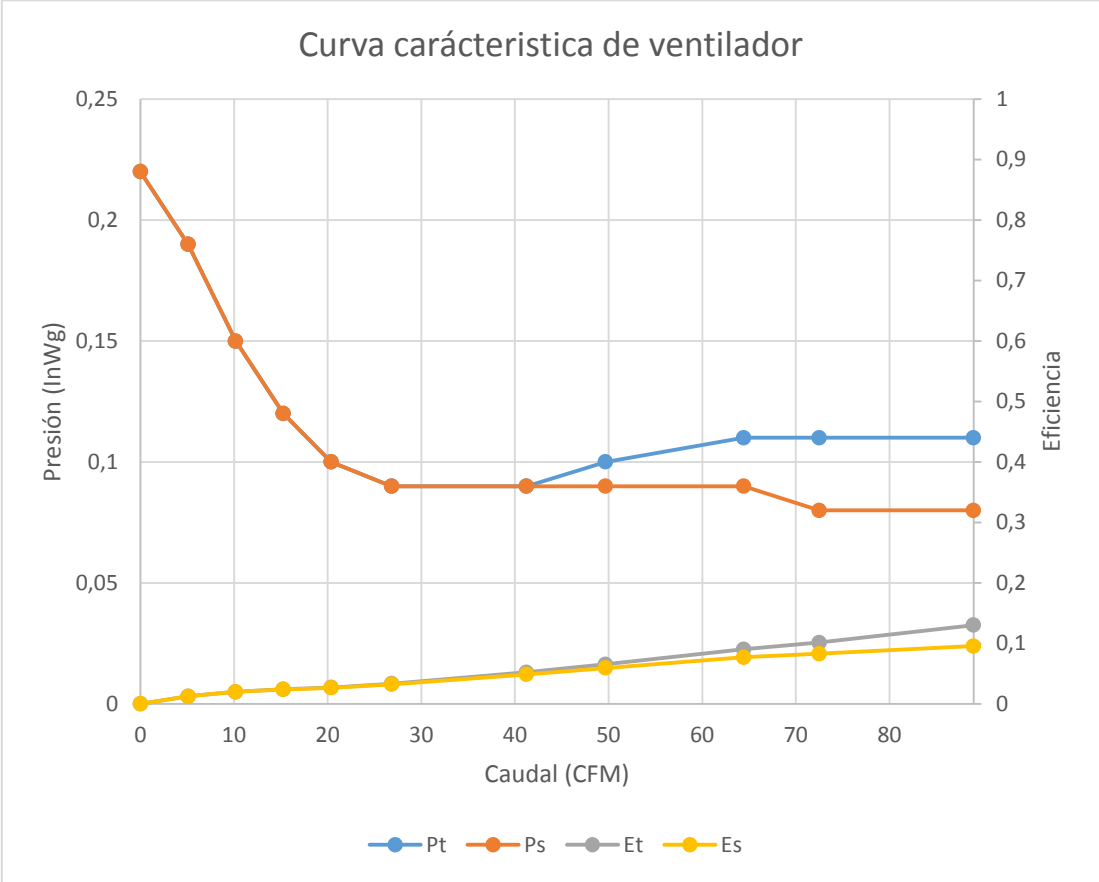
En este se trabaja con las unidades comúnmente empleadas comercialmente además de que los valores obtenidos son muy pequeños por tanto la gráfica se evidencia claramente usando el caudal en CFM (Pies cúbicos por minuto) y la presión en Inwg (pulgada de agua). Como se muestra en la tabla 9.

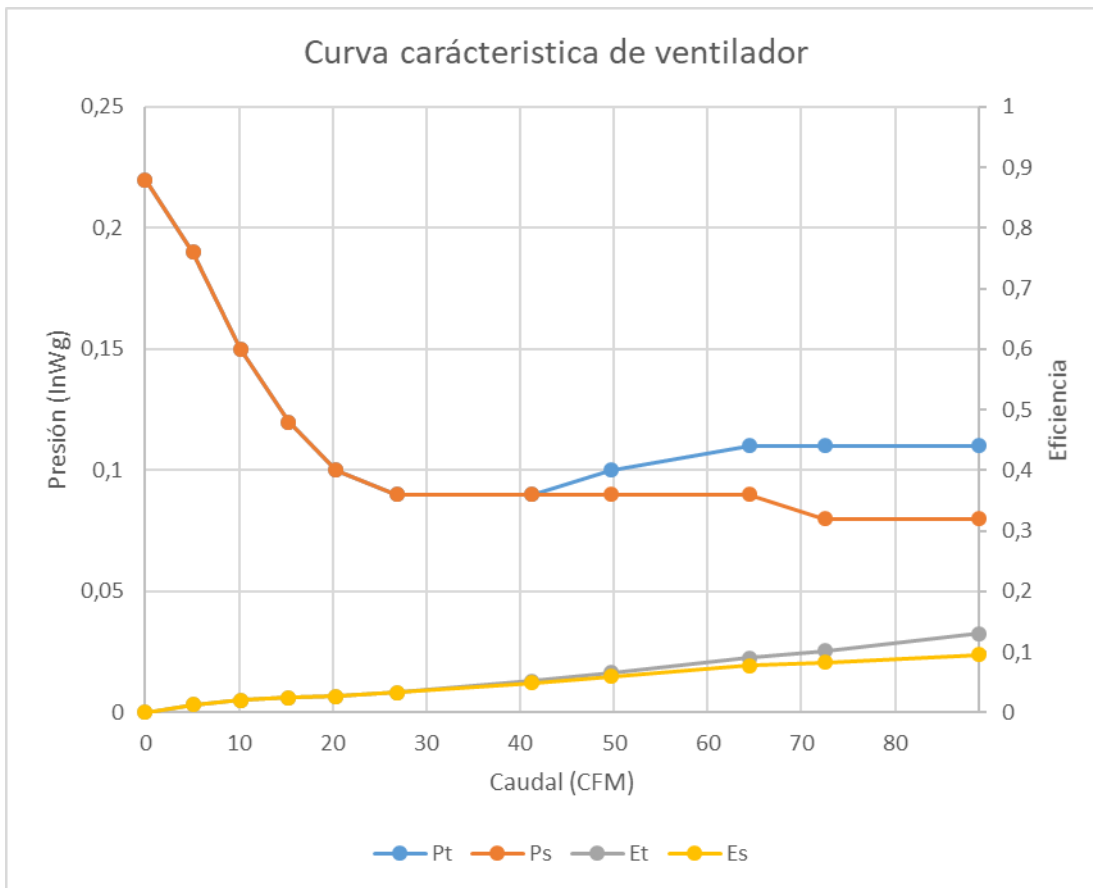
Tabla 9. Valores obtenidos de la prueba en unidades del sistema ingles

Q (CFM)	Pt(Inwg)	Ps (Inwg)	Eficiencia total del ventilador	Eficiencia estática del ventilador
0	0,22	0,22	0	0
5,09	0,19	0,19	0,01259113	0,01258463
10,18	0,15	0,15	0,01997963	0,01992761
15,27	0,12	0,12	0,02419454	0,02401895
20,37	0,1	0,1	0,02705675	0,02664054
26,84	0,09	0,09	0,03342421	0,032472
41,25	0,09	0,09	0,05234348	0,04888737
49,68	0,1	0,09	0,06533632	0,05929773
64,45	0,11	0,09	0,09026774	0,07708243
72,51	0,11	0,08	0,10155121	0,08277759
89	0,11	0,08	0,13021457	0,09549811

Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Curva característica del ventilador sistema ingles





Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

La curva característica obtenida con la prueba de ventilador permite concluir que el ventilador es un ventilador de presión alta dentro de las dos categorías en las que se puede clasificar un ventilador axial, ventilador de caudal alto o ventilador de presión estática alta. Ya que, en la prueba desarrollada, los valores obtenidos de presión estática son de mayor magnitud que los obtenidos de presión dinámica, que evidencia al momento de la toma de presión total que son debidos en mayor medida a la presión estática que a la dinámica, ya que esta última es baja y a lo largo de la prueba se mantiene constante.

De igual forma se puede evidenciar la relación inversa entre presión y velocidad, ya que cuando se cierra el paso de caudal a través del estrangulador de flujo, la presión aumenta

5. CONCLUSIONES

Se obtuvo un banco de pruebas de ventilador axial normalizado de bajo costo que cumple con cada uno de los requerimientos y especificaciones indicados por la norma AMCA 210. Este banco, contribuye al laboratorio y lo establece como pionero en la ciudad de Tunja en la caracterización de ventiladores axiales. Su tipo de instalación, salida libre con configuración tubo de Pitot en ducto de salida con tobera a la entrada, permite obtener un flujo uniforme y continuo previo al plano medición, que facilita la evaluación del ventilador axial de 120 mm obteniendo un caudal máximo de 0.045 m³/s y una velocidad máxima de 4.19 m/s y presión estática máxima de 48,9 Pa. De igual modo, mediante la interpretación de la norma AMCA 210 se extrajo el procedimiento normalizado para probar el ventilador.

El banco brinda un entorno controlado en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja a servicio de los estudiantes, profesores, y en general la comunidad academia tanto externa como interna o eventualmente a las empresas o particulares que deseen hacer uso de éste. De igual modo, este banco al servicio de la institución, facilita que los aspectos teóricos de las asignaturas, sean puesto en práctica, brindando apoyo a la labor docente, además de permitir la creación de un semillero para la investigación formativa en la Universidad en fluidos.

La curva característica obtenida con la prueba de ventilador permite concluir que el ventilador es de presión baja y caudal alto dentro de las dos categorías en las que se puede clasificar un ventilador axial, ventilador de caudal alto o ventilador de presión estática alta. Esto se reafirma ya que comercialmente el ventilador axial empleado aquí en el uso de la prueba, se conoce comercialmente como extractor; por lo tanto, es un dispositivo que se usa con la función de mover corrientes inducidas de aire mas no tiene la función de imprimir presiones altas. La curva característica obtenida coincide con el modelo establecido por la norma; sin embargo, para alcanzar los puntos más bajos de la curva es necesario contar con un ventilador axial auxiliar.

En la prueba desarrollada, se puede evidenciar la relación inversa entre presión y velocidad, ya que cuando se cierra el paso de caudal a través del estrangulador de flujo, disminuye la velocidad y la presión aumenta.

Se puede evidenciar por medio de las lecturas de presión tomadas durante la prueba, el perfil de velocidad del flujo de aire que produce el ventilador y atraviesa el banco principalmente en los valores de presión donde el estrangulador de flujo se encuentra con los anillos de mayor apertura de un área.

El desarrollo conceptual y la modelación CAD del banco facilitaron la implementación de diferentes esquemas que permiten comprender mejor la aplicación de los manuales de uso mantenimiento y la guía práctica.

Se identificó la importancia de los bancos de pruebas de ventilador en la etapa de pruebas en la producción de un ventilador y en general de un producto, ya que, en esta, se pone a prueba el funcionamiento en condiciones de operaciones reales. Junto a los avances tecnológicos como la simulación por computador para analizar el comportamiento de los fluidos, los métodos de prueba experimentales como el banco de pruebas de ventilador axial complementan el proceso de prueba y por tanto de verificación y garantía de los productos diseñados.

6. RECOMENDACIONES

Es importante no limitarse a la industria local, sino acudir a nivel nacional o incluso internacional. Para la fabricación del ducto de pruebas en acrílico, fue necesario desplazarse hasta la ciudad de Bogotá, debido a que la industria local no cuenta con la tecnología para fabricar el ducto, pues éste no es de fabricación convencional, de igual modo, por su longitud tuvo que ser fabricado en tres piezas. Para el caso del tubo de Pitot y el manómetro diferencial se requirió su importación porque a nivel nacional no estaban disponibles, pues comercialmente solo se consiguen elementos de medición industriales más no los enfocados a la educación. Igualmente se recomienda que, al trabajar bajo una norma, se acuda a seleccionar componentes de fabricantes que sus productos se enfoquen en cumplir las mismas normas. En este caso el fabricante Dwyer es el que fabrica diferentemente sus instrumentos para que cumplan con la norma AMCA.

Gracias a Arduino se desarrolló un contador de revoluciones de bajo costo. Este se puede reemplazar por uno de mayor precisión; sin embargo, ya que solo se quiere medir la velocidad de rotación nominal constante durante la prueba, es suficiente con la precisión entregada por esta herramienta, pues no es necesario medir cambios en la velocidad de rotación.

El banco permite ampliar los servicios que presta como se muestra a continuación. La instalación y configuración del banco de pruebas de ventilador, en comparación con un túnel de viento es similar, ya que se compone de los mismos elementos y se busca producir un flujo controlado; por lo tanto, el presente banco de pruebas brinda la posibilidad de concebir un banco experimental que abarque tanto la prueba de ventiladores como el desarrollo de pruebas aerodinámicas al diseño y construir una cámara de pruebas aerodinámicas al presente banco. De igual modo se puede diseñar una balanza aerodinámica que se adapte al banco.

De igual modo se puede hacer una simulación por computadora y analizar el flujo producido por el banco además de comparar los valores obtenidos para caracterizar el flujo producido por el ventilador, y analizar la transformación del flujo turbulento a la salida del ventilador, a laminar después de pasar por el estrangulador de flujo con que cuenta el banco.

Por la utilidad de los bancos de pruebas en la producción de ventiladores, otra mejora que se puede llevar a cabo en el presente banco es implementar el diseño del sistema de adquisición de datos automatizado, de modo que, a través de la instrumentación empleada, se puede hacer el registro e interpretación en tiempo real de los parámetros medidos en el banco y obtener directamente la curva característica del ventilador.

Este banco de pruebas permite la caracterización y evaluación del rendimiento de diseños o rediseños de ventiladores axiales de los prototipos planteados por la facultad en proyectos semestrales o semilleros de investigación. Si el usuario desea intercambiar el rodete del banco de pruebas puede intercambiarlo por uno de igual diámetro y diferente disposición de los álabes. En caso de que desee probar ventiladores de diferentes diámetros, debe contar con una pieza de transición entre el ventilador y el ducto, debido a que, para diámetros de ventiladores diferentes al aquí instalado, sean de mayores o menores dimensiones, requieren de esta pieza para ser adaptados al presente banco, siempre y cuando el ángulo de la pieza de transición no sea mayor de 7.5° de convergencia y no sea menor de 3.5° de divergencia.

El recinto donde será instalado el túnel de viento, debe contar con la capacidad de tomar aire fácilmente y expulsarlo de forma libre, preferiblemente hacia afuera del recinto y sin obstrucciones de ningún tipo. El espacio en donde esté instalado el banco debe contar con la capacidad de tomar aire fácilmente y expulsarlo de forma libre, preferiblemente afuera del recinto y sin obstrucciones de ningún tipo.

7. BIBLIOGRAFÍA

AMCA, Inc., 2016. AMCA 210 Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. 12th ed. Arlington Heights, Illinois, US: AMCA Publications, p.79.

Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

Rocha, A., 2017. Diseño de un banco de pruebas para ventiladores axiales en serie, norma ANSI/AMCA 21. Scientia et Technica, [online] 4(22), pp.320-329. Available at: <<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia>> [Accessed 02 August 2019].

Tangarife, J., 2015. Diseño de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores en refrigeradores domésticos. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Medellín, Colombia.: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Mecánica

ENRIQUEZ, David. Diseño de un banco de ensayos para ventiladores axiales de hasta 6000 m³/h. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Lima, Perú.: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2013. 115 p.

LORENZO, Óscar. Diseño de un banco de ensayo para ventiladores. Trabajo Master en Energías Renovables. Cartagena, Colombia.: Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela superior de Ingeniería Industrial, 2013. 181 p.

ASHRE. Handbook of refrigeration. Atlanta. ASHRE editions, 2018. 758 p. ISBN-13: 978-1939200976

CAIDERÓN, Franklin. Implementación de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores de refrigeradores domésticos en la UPS Cuenca. Cuenca, Ecuador.: Universidad politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2018. 95 p.

BAÑO, Óscar. Diseño de un banco de ensayo para ventiladores. Cartagena, Colombia.: Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Térmica y fluidos, 2013. 181 p.

CHICAS, Francisco. Diseño y construcción de un túnel de viento. Antiguo Cuscatlán, El Salvador.: Universidad centroamericana José Simeón Cañas. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2012. 170 p.

GONZALES, Salome. Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes. Lima, Perú.: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2012. 14 P

ACEVEDO, Felipe. Diseño de un túnel de viento para prueba de ventiladores y perfiles aerodinámicos. Medellín, Colombia.: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2006. 150 p.

MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas 2 ed. Madrid, España.: Ediciones del Castillo S, A., ISBN-10, 1986. 660 p. ISBN 9686034293.

CADFEM. Turbomachinery Design with ADT turbodesign Suite. [Imágen]. How to achieve high efficiency and performance with 3D Inverse Design. 2020. Disponible en: <https://www.cadfem.net/gb/en/shop/events/webinars/turbomachinery-design-with-adt-turbodesign-suite-17038.html>

RoHS, compliant. AC axial fan and blower [imagen]. Producto. España; RoHS compliant. 2020. p. 28. [Consultado: 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://static.chipdip.ru/lib/045/DOC003045837.pdf>

ZITRÓN. Banco de ensayos de Zitrón. Banco de pruebas más grande del mundo certificado AMCA 210. Asturias, España.:Zitrón Global. Servicios. 2020 disponible en: <https://zitron.com/services/banco-de-ensayos-de-zitron/?lang=es>

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos, 6 ed. Traducido por Carlos Roberto. Pearson Educación. 2006 .580 p. ISBN 9688805424.

WHITE, Frank. Mecánica de fluidos, 5 ed. 2004. Traducido por Marcos Vera Coello Mcgraw-Hill.: 816 p. ISBN 9788448140762.

CENGEL, Yunus. Termodinámica. 7 ed. 2012. Traducido por Gabriel Nagore Cázares. Mcgraw-Hill.: 1005 p. ISBN 9786071507433.

8. ANEXOS

Anexo A. Manual de uso, mantenimiento y guía de laboratorio para práctica experimental del banco de pruebas de ventilador axial

MANUAL DE USO, MANTENIMIENTO Y GUÍA DE LABORATORIO PARA
PRÁCTICA EXPERIMENTAL DEL BANCO DE PRUEBAS DE VENTILADOR
AXIAL PARA LOS LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA

José Federico Hernández Rojas

Universidad Santo Tomás seccional Tunja

Facultad de Ingeniería Mecánica

Año 2020

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVO DE LA GUÍA.....	3
RECOMENDACIONES	3
METODOLOGÍA	4
MARCO CONCEPTUAL	5
Planos de referencia del banco	5
Variables de flujo.....	6
Elementos de medición	6
¿Cómo conectar el tubo de Pitot al manómetro diferencial para leer los diferentes tipos de presión?	8
PARTE 1. MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DEL FLUJO PRODUCIDO POR EL VENTILADOR MEDIANTE EL USO DEL BANCO DE PRUEBAS	9
Procedimiento y preparación del banco de pruebas para realizar la prueba del ventilador.....	9
PARTE 2. CÁLCULO DE LOS PUNTOS A PARTIR DE LAS VARIABLES DE FLUJO A TRAVÉS DE LA HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL.....	16
PARTE 3. GRAFICAR LOS PUNTOS OBTENIDOS PARA OBTENER LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL VENTILADOR	22
MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL BANCO	25
ELEMENTOS DE INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN.....	26
ELEMENTOS DE MEDICIÓN	27
ELEMENTOS DE CONTROL.....	28
ELEMENTOS ESTRUCTURALES	28
REFERENCIAS.....	29

INTRODUCCIÓN

El informe de laboratorio de la prueba de ventilador axial aquí realizada, presenta los resultados obtenidos a través de la puesta en operación del ventilador en un entorno controlado, como lo es el banco de pruebas de ventilador axial, donde mediante la medición de las variables del flujo producido por el ventilador se determina su rendimiento y se representa a través de su curva característica. El objetivo de la presente práctica es por tanto, mediante la puesta en funcionamiento del banco de pruebas, determinar el rendimiento del ventilador axial de 117 mm con el que viene equipado el banco. Esta guía, presenta el procedimiento normalizado para obtener el rendimiento del ventilador y el procedimiento para el uso del banco de pruebas, por medio de la descripción de cada uno de sus componentes y la representación de estos por figuras para servir como guía en la correcta manipulación del banco. Finalmente se presenta el manual de mantenimiento del banco.

Para determinar la curva característica del ventilador se debe seguir los pasos indicados y utilizar la herramienta presentada en la hoja de cálculos de Excel, que permite obtener los puntos para posteriormente graficarlos y obtener así la curva característica del ventilador.

OBJETIVO DE LA GUÍA

Determinar experimentalmente la curva característica del ventilador a través del uso asertivo del banco de pruebas ventilador axial

RECOMENDACIONES

- Tenga en cuenta que los procedimientos indicados se deben seguir en orden.
- Cada medición de la prueba contiene algún error y el valor verdadero no se puede conocer porque la magnitud del error no se puede determinar exactamente. Sin embargo, se ha elegido una probabilidad del 95% dentro del cual probablemente se encuentre el verdadero valor como aceptable según la norma.
- Si el usuario desea intercambiar el rodete del banco de pruebas puede intercambiarlo por uno de igual diámetro y diferente disposición de los alabes. En caso de que desee probar ventiladores de diferentes diámetros, debe contar con una pieza de transición entre el ventilador y el ducto ya

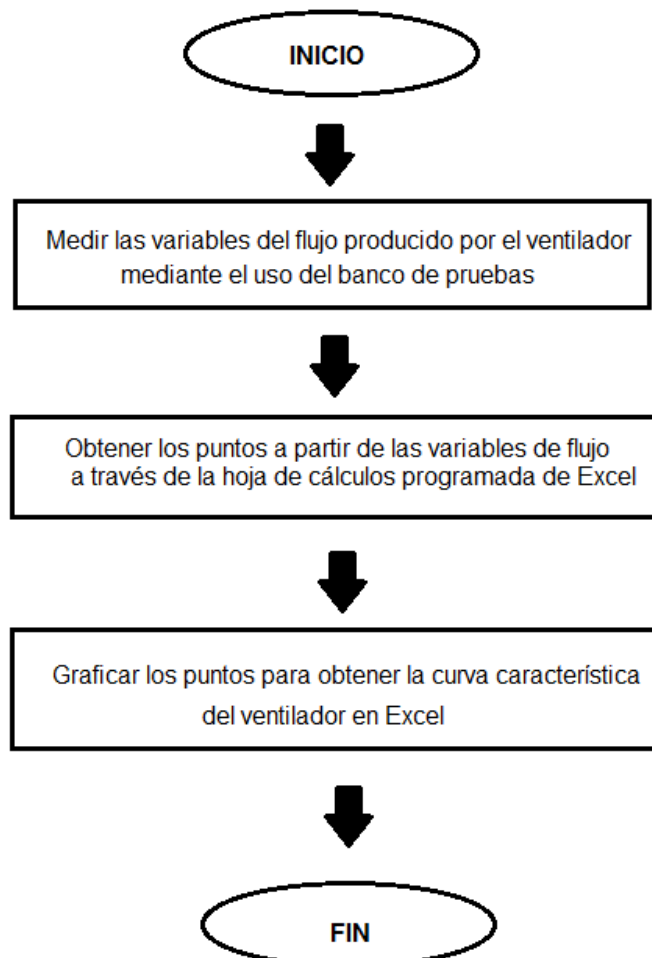
que diámetro de ventiladores diferentes al aquí instalado, ya sea de mayores o menores requieren esta pieza para ser adaptados al presente banco, siempre y cuando los ángulos de la pieza de transición de no sea mayor 7.5° de convergencia y no sea menor de 3.5° de divergencia.

- Se debe contar con un total de 4 horas de clases, ya que en las primeras se realizarán la medición de variables, luego los cálculos correspondientes y finalmente graficar los valores obtenidos en los pasos anteriores para obtener la curva característica del ventilador axial.

Metodología

El flujograma presentado a continuación contiene la metodología empleada para obtener la curva característica del ventilador a prueba como se muestra en la figura 1. Cada parte desarrolla, está constituida por su procedimiento normalizado.

Figura 1. Metodología para probar el ventilador axial a través del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of

MARCO CONCEPTUAL

Se presentan las definiciones que se deben conocer para desarrollar la guía de laboratorio del banco de pruebas de ventilador axial, agrupadas de acuerdo a su función en el banco.

PLANOS DE REFERENCIA DEL BANCO

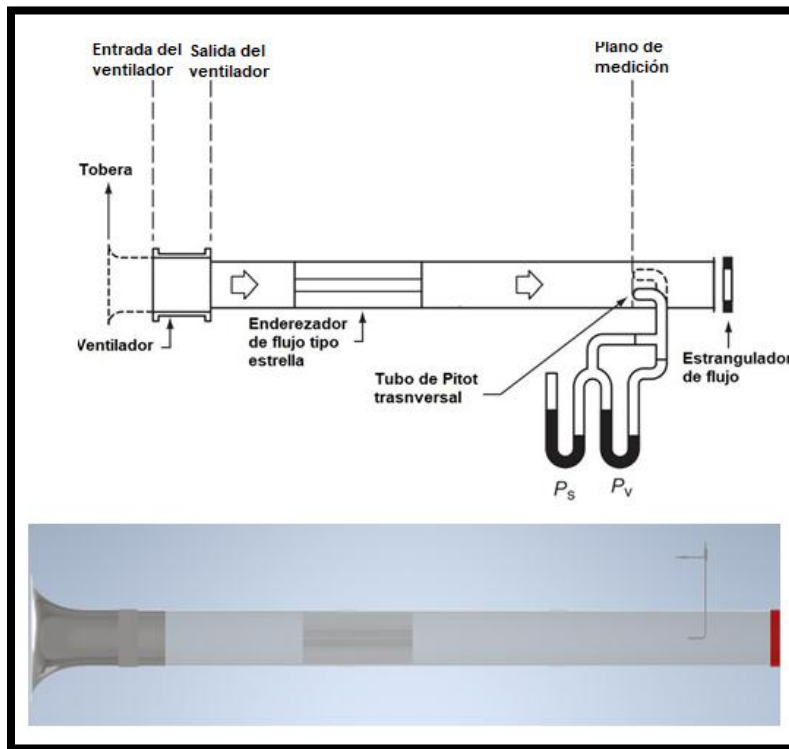
Entrada del ventilador: es donde se encuentra ubicada la tobera

Salida del ventilador: es donde se encuentra acoplado el ducto de pruebas que contiene el plano de medición

Plano de medición: es donde se encuentra ubicado el tubo de Pitot que capta la presión del flujo producido por el ventilador y la envía al manómetro diferencial.

En la figura 2 expuesta a continuación se muestra la ubicación de los planos en el banco.

Figura 2. Planos de referencia en el banco de pruebas de ventilador



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

VARIABLES DE FLUJO

Presión: Fuerza por unidad de área. En fluidos, corresponde a la energía por unidad de volumen de fluido. En el presente banco se medirá en pulgadas de agua (In.Wg) y la conversión a Sistema Internacional se realiza bajo el siguiente factor de 1 In.Wg = 249.089 Pa.

Presión dinámica: La porción de presión de aire que existe en virtud de la velocidad de movimiento del aire.

Presión estática: La porción de presión de aire que existe en virtud del grado de compresión. Es perpendicular a las paredes del ducto. Si se expresa como una presión manométrica, puede ser positiva o negativa.

Presión total: La presión de aire que existe en virtud del grado de compresión y la velocidad de movimiento del aire. Es la suma algebraica de presión de velocidad y presión estática en un punto. Si el aire está en reposo, su presión total será igual a la presión estática.

$$P_T = P_s + P_d$$

ELEMENTOS DE MEDICIÓN

Manómetro diferencial de columna líquida: instrumento de medición que mide la diferencia de presión entre dos puntos (presión alta y presión baja) de un fluido se muestra el modelo usado en la figura 3. En el banco muestra la presión estática y total.

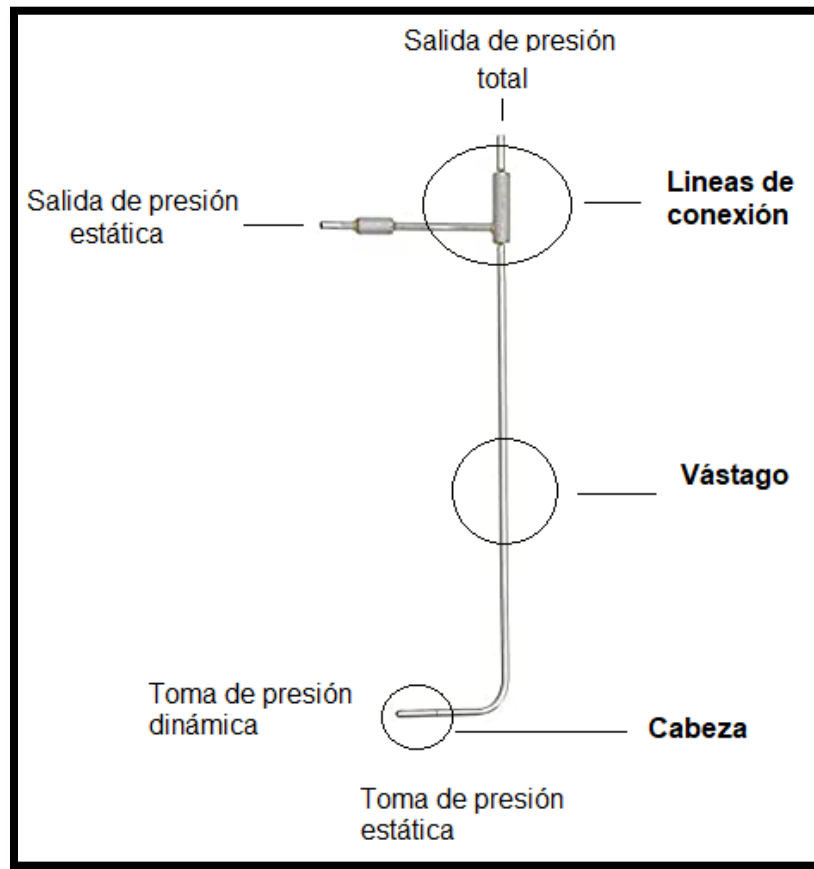
Figura 3. Manómetro diferencial utilizado Mark II 25 del fabricante Dwyer



Fuente: elaboración propia, con base en Dwyer Instruments.

Tubo de Pitot: es instrumento que tiene como función captar la señal de presión estática y presión total en el ducto del banco para posteriormente transferirla al manómetro empleado. Se compone de las partes mostradas en la figura 4.

Figura 4. Partes del tubo de Pitot



Fuente: elaboración propia con base en Dwyer Instruments.

¿CÓMO CONECTAR EL TUBO DE PITOT AL MANÓMETRO DIFERENCIAL PARA LEER LOS DIFERENTES TIPOS DE PRESIÓN?

Para medir la presión total se debe conectar la línea de salida de presión total del tubo de Pitot al puerto de presión mayor del manómetro, las demás líneas, tanto del manómetro como del tubo de Pitot quedan abiertas a la atmosfera como se muestra en la figura 5. Véase las partes del tubo de Pitot indicadas anteriormente en la figura 4.

Para medir la presión estática se debe conectar la línea de salida de presión estática del tubo de Pitot al puerto de presión mayor del manómetro, las demás líneas, tanto del manómetro como del tubo de Pitot quedan abiertas a la atmosfera como se muestra en la figura 6. Véase las partes del tubo de Pitot indicadas anteriormente en la figura 4.

Figura 5. Conexión para medir la presión total

Figura 6. Conexión para medir la presión estática



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Nota: si se conecta al puerto de presión menor del manómetro diferencial, el líquido del manómetro se irá hacia valores de presión menores que esto no indicara debido a que cuenta con capacidad para ese tipo de presiones.

La presión de la dinámica en un punto se obtendrá mediante la expresión que relaciona la presión estática con la dinámica. $P_t = P_d + P_s$

Perdidas de presión: Una disminución en la presión total debido a la fricción y / o turbulencia.

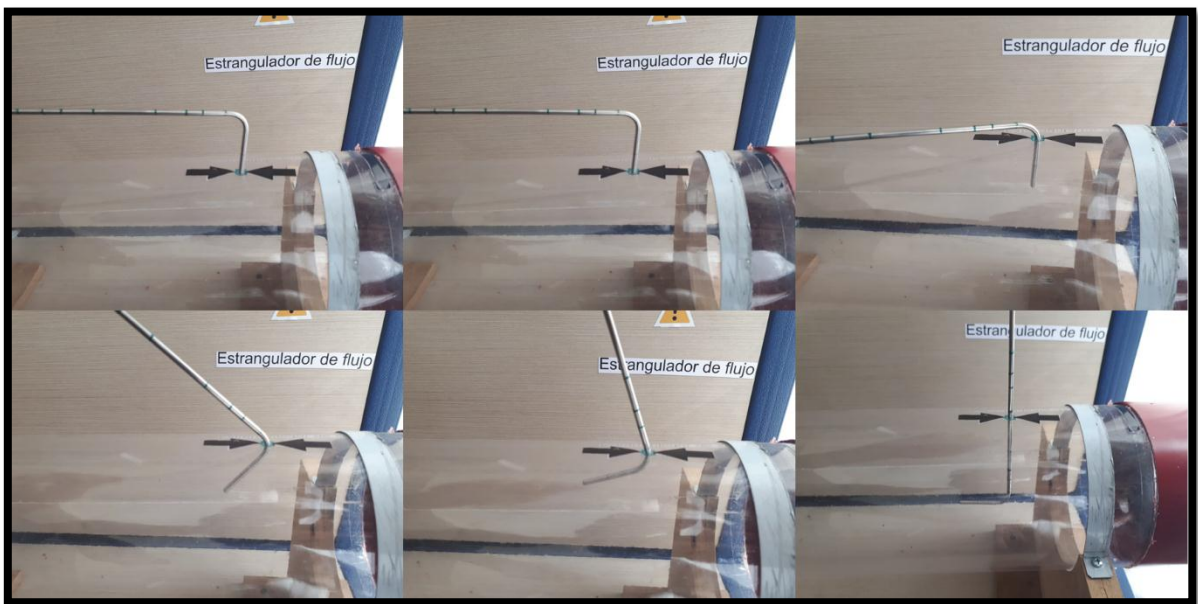
ARTADO 1. MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DEL FLUJO PRODUCIDO POR EL VENTILADOR MEDIANTE EL USO DEL BANCO DE PRUEBAS

Objetivo de este apartado: Obtener experimentalmente las variables de operación del ventilador montado en el banco de pruebas de ventilador axial.

PROCEDIMIENTO Y PREPARACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA REALIZAR LA PRUEBA DEL VENTILADOR

1. Inserte el tubo de Pitot en el orificio en el plano de medición correspondiente, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Proceso para insertar el tubo de Pitot en el orificio del plano de medición



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

2. Verifique que el líquido del manómetro se encuentre en el nivel cero, de no ser así gire la perilla llama set y haga coincidir el nivel del líquido con la escala en el número cero, como se muestra en la figura 8. La perilla puede ser girada en sentido horario si se quiere desplazar el fluido hacia la derecha o en sentido anti horario si se quiere desplazar el fluido hacia la izquierda.

Figura 8. Calibración del líquido del manómetro en el valor 0. Giro de la perilla set.



Fuente: elaboración propia, con base en Dwyer Instruments.

3. Conecte la manguera en los puertos de medición correspondientes, tanto en el manómetro como en el tubo de Pitot de acuerdo a la presión que se esté midiendo, en de esta manera la toma de presión esta lista para iniciar la prueba. En la figura 9 se muestra a derecha la toma de presión total y a la izquierda de presión estática.

Figura 9. Conexión del tubo de Pitot al manómetro.

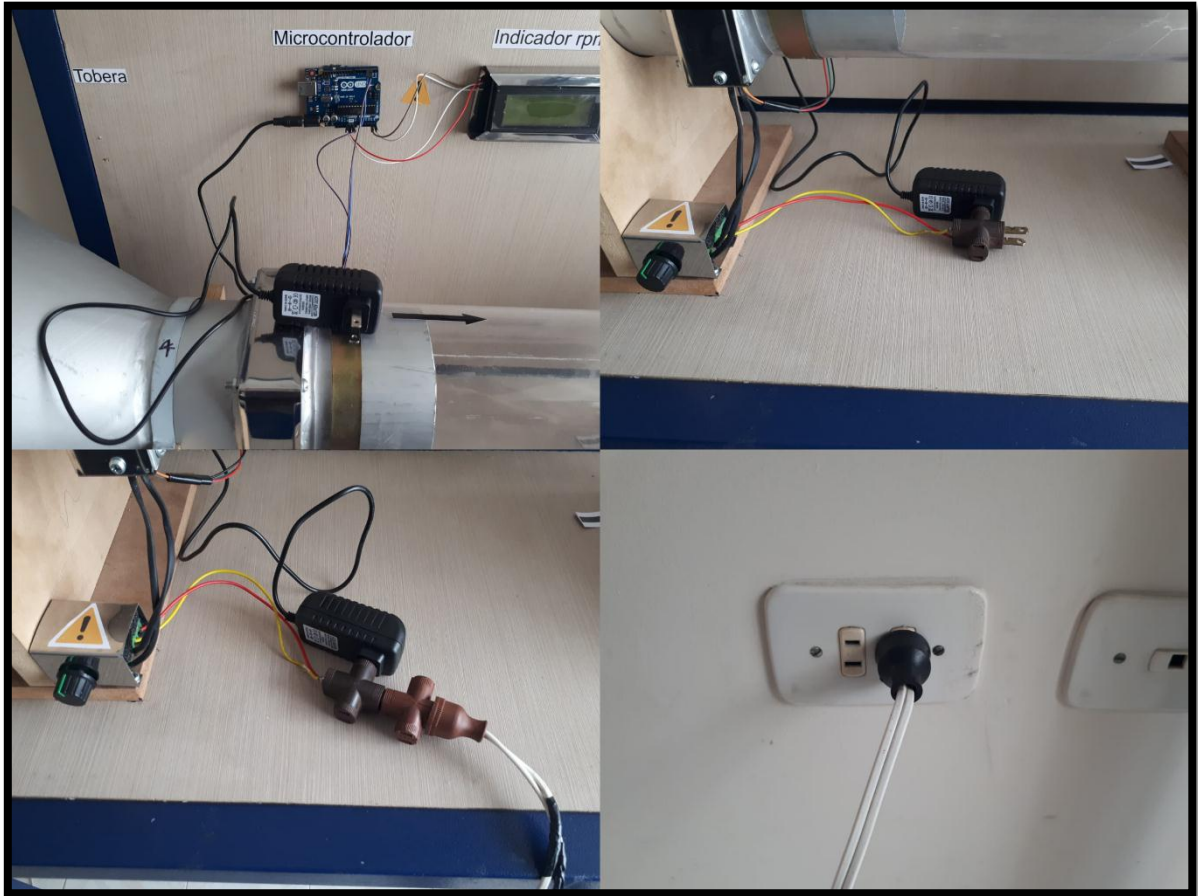


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

4. Conecte el Arduino a la toma de corriente al igual que el ventilador como se muestra en la figura 10, recuerde que el banco de pruebas funciona a 110 v, y

pulse el botón reset del Arduino para iniciar la cuenta de la velocidad de rotación como se muestra en la figura 11.

Figura 10. Energización del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Figura 11. Botón de reset del microcontrolador Arduino



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

5. Verifique que la perilla del control de velocidad este en 0 (variador de frecuencia) sino póngalo en cero, como en la figura 12. En esta posición el ventilador no gira, las rpm están en 0 y la perilla no puede girarse más hacia la izquierda.

Figura 12. Perilla de control de manómetro en velocidad 0.



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

6. Conecte el ventilador a toma corriente, recuerde que es a 110 V y déjelo que suba hasta la velocidad nominal para esto verifíquela en la pantalla LCD con la cuenta del banco. La prueba del ventilador se realizará constante, es decir, a la velocidad nominal del ventilador. Se indicarán las rpm en la pantalla el ventilador girará a su máxima velocidad y la perrilla no se podrá girar más hacia la izquierda como se muestra en la figura 13.

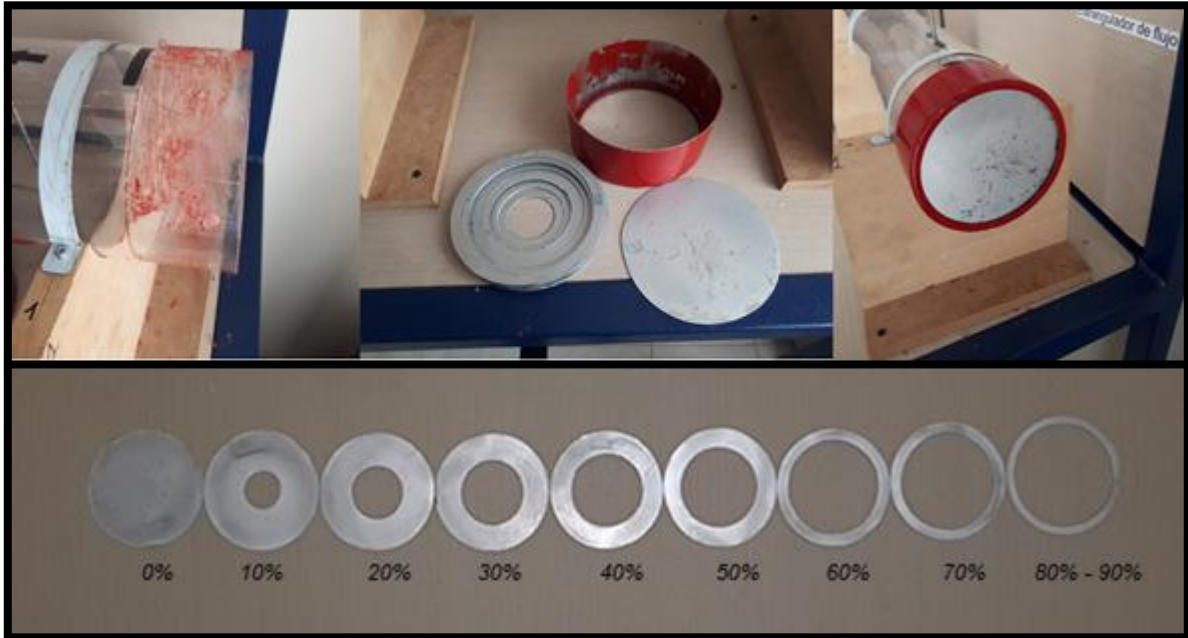
Figura 13. Perilla en posición de velocidad de rotación máxima



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

7. Ponga en el estrangulador de flujo la placa correspondiente a caudal 0, esto es la placa sin orificio de salida. Recuerda que se intercambiarán a medida que avanza la prueba pues se deben tomar 8 para cada área variando la profundidad a la que se inserta el tubo de Pitot. Cuando se cambia el área de salida, el caudal a su vez cambia. De esta forma se obtienen las parejas presión caudal, sin embargo, estas deberán transformarse como se muestra en el apartado 2 de la guía, donde se tiene en cuenta pérdidas entre otros factores. En la figura 14, se muestra la ubicación del estrangulador y los anillos intercambiables, para insertar el estrangulador del ducto de pruebas se inserta a presión, para extraerlo se debe halar hacia atrás girando en sentido horario.

Figura 14. Ubicación del estrangulador y proceso de extracción del mismo.

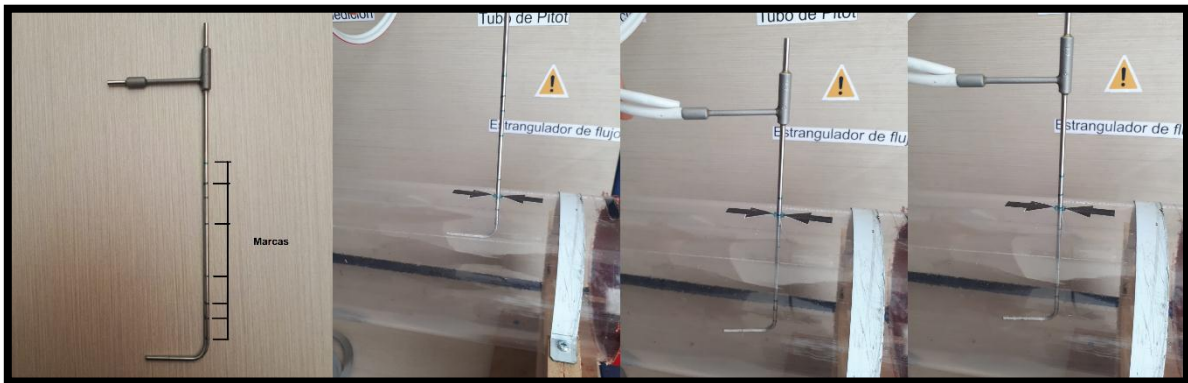


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Teniendo en cuenta el montaje del paso anterior, con el ventilador encendido y en régimen de rotación constante ponga el primer anillo desde el 0% del área (caudal 0) hasta el 100% del área (caudal libre) para cada anillo, introduzca el tubo de Pitot, haga que coincida cada marca de color verde que se encuentra en el vástago del tubo de Pitot con el borde del orificio por donde insertó el tubo en el ducto, tome y anote el valor de presión que indica el manómetro, en total son 8 marcas, recuerde que debe medir dos tipos de presión: presión estática y presión total después deberá cambiar el anillo y continuar así sucesivamente hasta usar todos los anillos. La presión dinámica, se obtendrá algebraicamente ya que $P_t = P_s + P_d$. Posteriormente estos valores de presión se promediarán bajo la ecuación que se expone en el apartado de cálculos. En el apartado de cálculos se explica en detalle el proceso. A continuación, en la figura 15 se muestran las marcas sobre el tubo de Pitot y el proceso de variación de la profundidad. El punto inicial de la curva es cuando el caudal es cero y la presión estática es máxima. Las diferentes área permiten que los puntos de datos se recopilen desde una

condición de caudal 0 "sin flujo" hasta una condición de caudal libre "flujo completo" que se logra con el uso de los anillos del estrangulador.

Figura 15. Variación de la profundidad de inserción del tubo de Pitot



Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

Recuerde que la curva característica del ventilador es la relación entre el aumento de presión y el caudal de volumen para una velocidad de impulsor constante (RPM). Donde la presión está en función del caudal, es por eso que a través de la variación del área de salida del ducto de pruebas mediante el uso del estrangulador de flujo como se mostró anteriormente se varía el caudal y por ende la presión.

Importante: Tenga en cuenta que el manómetro columna de líquida inclinada cuenta con dos tomas de presión, las cuales, son presión alta y presión baja. Estas tomas deben ser conectadas al tubo de Pitot a través de la manguera con que se cuenta. Utilice la manguera que cuenta con una línea roja para presión alta y la que no, para presión baja. Conecte el otro extremo al tubo de Pitot. Tenga en cuenta que en el tubo de Pitot la presión total sale por el puerto que es perpendicular a la punta del Pitot. Y la presión estática sale por el puerto que es paralelo a la punta del tubo de Pitot. Y lo explicado en el marco conceptual en elementos de medición.

Nota: recuerde que el manómetro se encuentra en sistema ingles por lo tanto se deberá convertir las unidades de presión de pulgadas de agua, en las que se cuentan los datos obtenido a pascales mediante el factor mencionado en el apartado de presión en el marco con conceptual.

8. Diríjase a la sección de cálculos para continuar

PARTE 2. CÁLCULO DE LOS PUNTOS A PARTIR DE LAS VARIABLES DE FLUJO A TRAVÉS DE LA HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL

Objetivo de este apartado: Calcular por medio de la hoja de cálculo en Excel los puntos a graficar a partir de las variables de flujo obtenidas anteriormente.

El proceso de cálculo que se muestra a continuación se encuentra semi automatizado en la hoja de cálculo de Excel adjunta a este documento. El proceso que se muestra a continuación, explica los cálculos que se llevan a cabo en la hoja, por lo que se mejora la comprensión de los conceptos empleados y se da mayor claridad en la transformación de variables de flujo en puntos para graficar la curva característica.

PROPIEDADES DEL AIRE

Se toman como constante los siguientes valores, teniendo en cuenta que son las propiedades del aire promedio de la ciudad de Tunja. Con el objetivo de determinar la densidad y la viscosidad del aire atmosférico durante la prueba de laboratorio

Los siguientes valores serán tomados como constantes:

Altura: 2822 msnm

Temperatura bulbo seco promedio: 13 °c.

Temperatura bulbo húmedo: 10.84 °c

Con estos se obtiene directamente el valor de la densidad que se usará durante toda la prueba.

Densidad del aire Tunja: 0.867kg/m³

Presión barométrica: 717.1hPa

Sin embargo a continuación se muestra el proceso de calculo que se debe llegar a cabo en que caso de que se esté probando un ventilador que produzca un salto de presión considerable, lo que produciría un cambio considerable en la densidad del aire a prueba, el cual debe cuantificarse. Los valores anteriormente mostrados fueron obtenidos a partir de la carta psicométrica interactiva del enlace tomado de la siguiente página web <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometric>

[os.html](#) y tomando como variables de entrada la temperatura promedio de Tunja, la altura y la humedad relativa.

Nota: la densidad del aire en el laboratorio será tomada como constante para el aire a medida que pasa por el banco de pruebas, ya que los cambios de presión que sufre el aire por efectos del ventilador a prueba son despreciables debido al salto de presión bajo que produce el ventilador. Por tanto, la densidad para todos los planos de referencia será tomada como igual, estos son el plano de entrada del ventilador (plano 1), plano de salida del mismo (plano 2) y plano de medición (plano 3) del banco.

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo que consiste en la aplicación de las ecuaciones en el orden presentado. El valor de la constante R es de 287.1 J/Kg K (55.35 ft lbf/lbm °R). Se debe medir mediante el uso de un termómetros de bulbo húmedo la temperatura, temperatura de bulbo húmedo (T_w) y de uno de bulbo seco la temperatura de bulbo seco (T_d), se tomará también la presión barométrica P_b de una hoja psicométrica local.

1. Calcular la presión saturada de vapor (p_e) a la temperatura de bulbo húmedo

$$p_e = 3.25t_{w0}^2 + 18.6t_{w0} + 692$$

2. Calcular la presión parcial de vapor (p_p)

$$p_p = p_e - p_b \left(\frac{t_{d0} - t_{w0}}{1500} \right)$$

3. Calcular la densidad del aire en el plano 1, este plano es la entrada del ventilador.

$$\rho_0 = \frac{p_b - 0.378p_p}{R(t_{d0} + 273.15)}$$

4. Calcular la densidad en el plano de medición. Recuerde que la densidad se asumió como constante para los tres planos de referencia del banco de pruebas.

$$\rho_x = \rho_0 \left[\frac{t_{d0} + 273.15}{t_{dx} + 273.15} \right] \left[\frac{P_{sx} + p_b}{p_b} \right]$$

5. Densidad del aire del ventilador. Se calcula usando la densidad del plano de medición, usando la presión total del plano de entrada del ventilador que se toma como 0 ya que está abierto este plano a la atmosfera, la temperatura de bulbo seco del plano de medición (esta es la misma para los tres planos, debido al salto de presión mínimo entregado por el ventilador).

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

6. Calcular la viscosidad dinámica. A partir de este paso, se reasume el procedimiento ya que se ha llegado al mismo punto de conocer la densidad.

$$\mu = (17.23 + 0.048t_d) \times 10^{-6}$$

7. Calcular el promedio de las 8 tomas de presión dinámica (P_{v3}) medidas en el primer apartado de la guía. El subíndice 3 hace referencia a que es la presión medida en el plano 3

$$P_{v3} = \left(\frac{\sum \sqrt{P_{v3r}}}{n} \right)^2$$

8. Calcule la velocidad (“lineal”) del flujo a partir del promedio de la presión dinámica.

$$V_3 = \sqrt{\frac{2P_{v3}}{\rho_3}}$$

9. Calcular el caudal en el plano de medición usando la velocidad lineal del flujo en el plano de medición por el área (A_3) del plano de medición. Recuerde que las áreas de los planos de referencia del banco son iguales

$$Q_3 = V_3 A_3$$

10. Calcule el caudal del ventilador. Recuerde que se asumió la densidad constante en todos los planos.

$$Q = Q_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho} \right)$$

11. Calcular la presión dinámica del ventilador la anterior calculada fue la del plano de medición

$$P_v = P_{v3} \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2$$

12. Calcule el promedio de la presión estática

$$P_{s3} = \frac{\sum P_{s3r}}{n}$$

13. Calcule el diámetro hidráulico. Para ductos de sección circular es el mismo diámetro interno $D_h = d_i$.

14. Calcular de número de Reynolds. Se calcula basado en el diámetro hidráulico. Se usan las propiedades del aire obtenidas al principio como la velocidad lineal v en m/s

$$Re = \frac{D_h V \rho}{\mu}$$

15. Calcular el coeficiente de fricción. Calcule las pérdidas de presión. las pérdidas de presión se calcularán para conductos de medición y enderezadores ubicados entre el ventilador y el plano de medición.

$$f = \frac{0.14}{Re^{0.17}}$$

16. Calcule la pérdida por fricción del enderezador tipo estrella es el mismo L/D

$$\zeta_s = 0.95Re^{-0.12}$$

17. Calcular Pt1 la presión total a la entrada del ventilador. Como la entrada es entrada libre o abierta. Cuando el ventilador extrae directamente de atmósfera, Pt1 se considerará igual a presión atmosférica, que es de calibre cero, de modo que:

$$P_{t1} = 0$$

18. Calcular la presión total a la salida del ventilador

El tipo de medición empleado en este banco es de salida con tubo de Pitot. Cuando el ventilador descarga en un ducto con un tubo Pitot transversal, la presión total (Pt2) se considerará igual a la suma de la presión estática promedio (Ps3) y la presión de velocidad (Pv3) corregida por la pérdida de fricción debido a la longitud equivalente (Le) del enderezador de flujo y la longitud (L2,3) del conducto entre la salida del ventilador y el plano de medición.

19. Calcular la presión Pt2 esto es presión total a la salida del ventilador cuando se usa un enderezador de flujo tipo estrella

$$P_{t2} = P_{s3} + P_{v3} + f \left(\frac{L_{2,3}}{D_{h3}} - 2 \right) P_{v3} + 0.95(Re_3)^{-0.12} P_{v3}$$

20. Calcular La presión total del ventilador (Pt) en condiciones de prueba se calculará a partir de:

$$P_t = P_{t2} - P_{t1}$$

Esta es una expresión algebraica de modo que si P_{t1} es negativo, P_t será numéricamente mayor que P_{t2} .

21. Calcular la presión estática del ventilador (P_s)

$$P_s = P_t - P_v$$

22. Calcular la potencia de entrada del ventilador. Cuando se utiliza un motor eléctrico calibrado para medir la potencia de entrada, la entrada de potencia del ventilador (H) se puede calcular a partir de la entrada de potencia (W) al motor y la eficiencia del motor (η) utilizando esta eficiencia se obtiene del habook de referenia de general electric:

$$H = W\eta$$

23. Calcular la potencia de salida del ventilador. Potencia de salida del ventilador (H_o) es proporcional al producto del caudal del ventilador (Q) con la presión total del ventilador (P_t) con el aire incompresible. Pero como el aire es compresible, los efectos termodinámicos influyen en la salida y se debe aplicar un coeficiente de compresibilidad (K_p) para hacer que la salida de potencia sea proporcional a (QP_t). Sin embargo acá se desprecia K_p por la baja presión que imprime el ventilador sobre el aire.

$$H_o = QP_t K_p$$

De lo contrario si necesario calcularlo se hace a partir

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

Dónde

$$x = \frac{P_t}{P_{t1} + p_b} \quad \text{y} \quad z = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \left(\frac{\left[\frac{H}{Q} \right]}{P_{t1} + p_b} \right)$$

Donde t_1 es la temperatura en el plano 1, plano de entrada. H la potencia de entrada del motor (voltaje x intensidad) del motor y Q el caudal del ventilador.

24. Calcular la eficiencia total del ventilador (η_t) es la razón entre la salida de potencia del ventilador y la entrada de potencia del ventilador.

$$\eta_t = \frac{QP_t K_p}{H}$$

25. Calcular la eficiencia estática del ventilador (η_s) se calcular con el producto de la eficiencia total del ventilador (η_t) con la razón de la presión estática del ventilador (P_s) con la presión total del ventilador (P_t).

$$\eta_s = \eta_t \left(\frac{P_s}{P_t} \right)$$

PARTE 3. GRAFICAR LOS PUNTOS OBTENIDOS PARA OBTENER LA CURVA CARACTERISTICA DEL VENTILADOR

1. Realice una tabla de datos compuesta por los siguientes datos que obtuvo como resultado:
 - Caudal
 - Presión estática del ventilador
 - Presión total del ventilador
 - Eficiencia estática del ventilador
 - Eficiencia total del ventilador
2. Convierta los valores obtenidos a cfm y InH₂O

Nota: recuerde que las unidades de los puntos obtenidos están en sistema internacional, puede graficarlos y obtener la curva característica sin embargo, se recomienda convertirlos a sistema inglés, específicamente a CFM (pies cuadrados por minuto) el caudal y a pulgadas de agua la presión ya que en estas unidades se puede apreciar mejor la curva característica

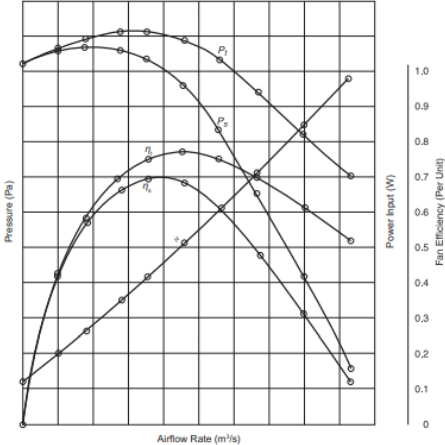
del ventilador y principalmente porque comercialmente, las curvas características de los ventiladores pequeños como el aquí probado, se presente en estas unidades.

3. Obtenga la gráfica de rendimiento o curva característica con los resultados de la prueba del ventilador e identificar cada punto con las coordenadas obtenidas.

La grafica está compuesta por dos ejes ordenados (Eje Y) y un eje de abscisas (eje X). Divida cada eje en 10 unidades equidistantes. En las ordenas, en el eje izquierdo se ubica la presión, en el eje derecho se encuentra la eficiencia y finalmente en el eje de la abscisa se encuentra el caudal. Tenga en cuenta que en el plano representado se obtienen 5 funciones, las dos primeras son la gráfica de la presión total del ventilador y la segunda la presión estática del ventilador, tenga especial cuidado con los valores representados pues las presiones graficadas son las presiones del ventilador mas no las presiones del plano de medición. Paso seguido se grafica la eficiencia estática y eficiencia total del ventilador y finalmente la potencia de entrada del ventilador.

Se enumerará la velocidad de rotación velocidad a la que se obtuvieron los graficos. Si todos los resultados se obtuvieron a la misma densidad de aire esa densidad de aire se enumerará. Se pueden trazar gráficos con eficiencia total del ventilador y / o eficiencia estática del ventilador según las ordenadas. La presión barométrica no se enumerará porque la presión del ventilador no supera los 2.5 kPa (10 in.wg). A continuación se muestra una curva modelo en la figura 16. Sin embargo, en la prueba del ventilador actual, no se alcanzara a obtener la curva en su totalidad, ya que por el salto pequeño del ventilador, no se alcanza un caudal completamente libre pues el ventilador no es capaz de vencer todas las pérdidas de presión presentes en el banco, para lograrlo sería necesario instalar un ventilador auxiliar, con el que el actual banco no cuenta.

Figura 16. Curva modelo

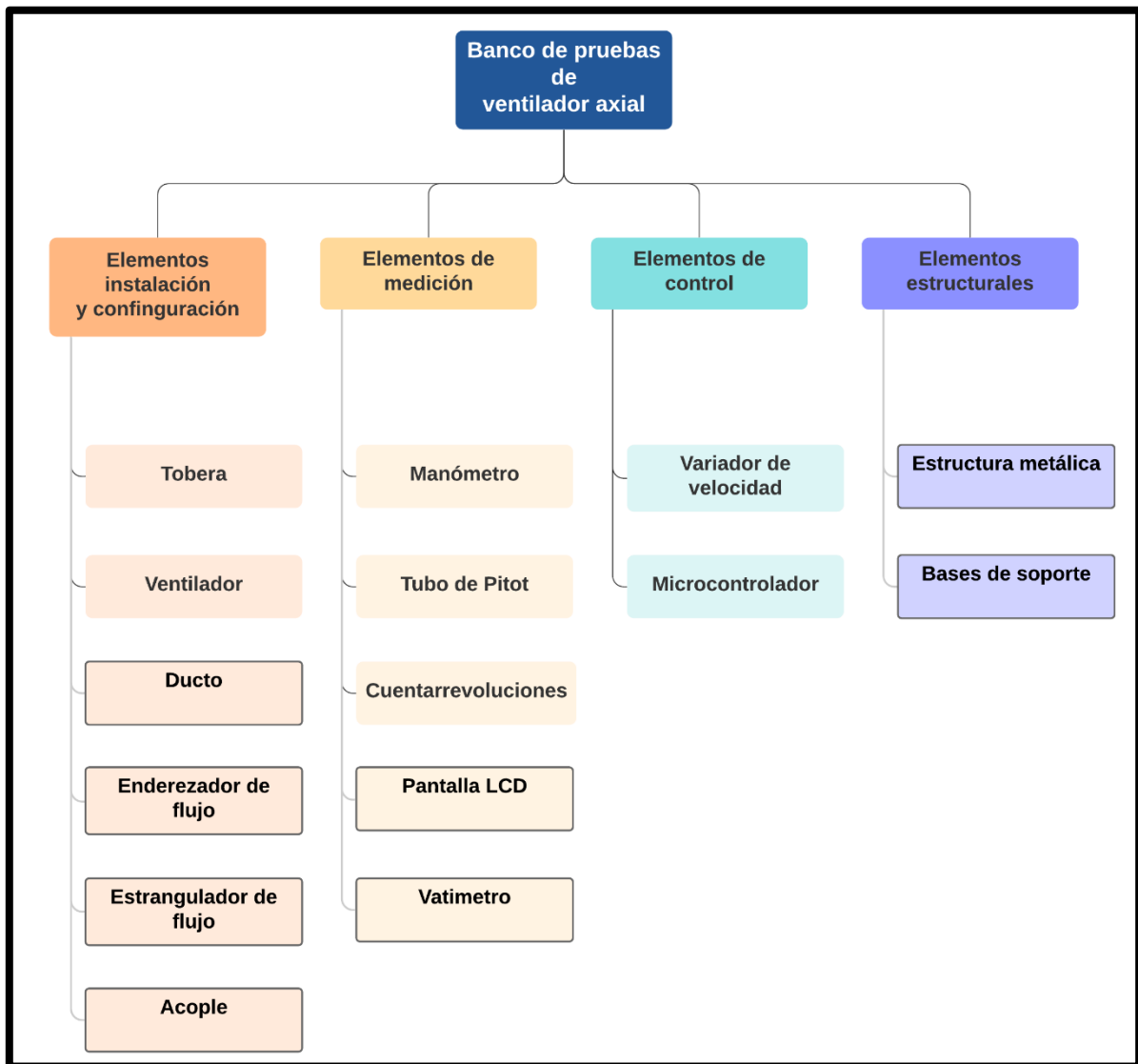


Fuente: elaboración propia, con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL BANCO

El banco de pruebas está compuesto por los elementos mostrados a continuación clasificados por categorías de acuerdo a la función que cumplen estos en el banco de pruebas como se muestra a continuación en la figura 1.

Figura 1. Partes del banco de pruebas de ventilador axial.



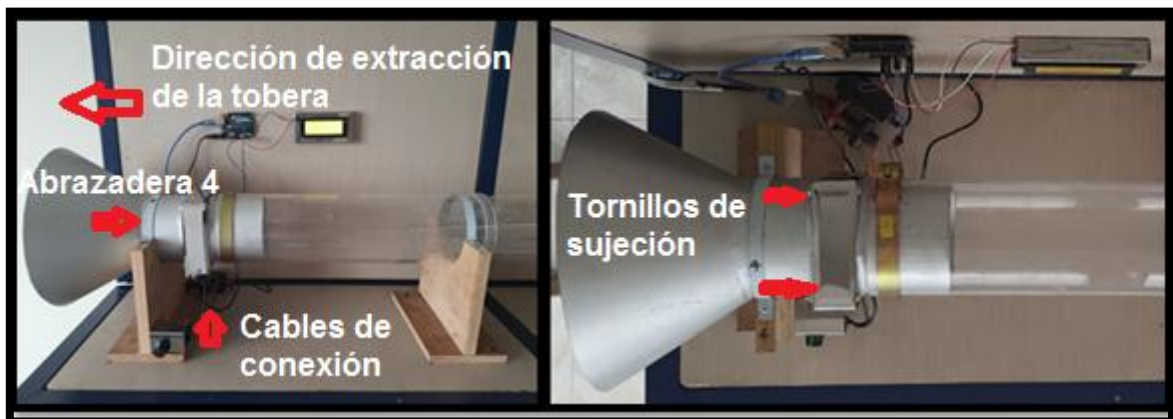
De los elementos mostrados anteriormente a continuación se indica el mantenimiento requerido en caso de ser necesario.

ELEMENTOS DE INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN. No requieren mantenimiento ya que su posición en el banco de pruebas es estática, no implica movimiento, por tanto no está soportando acciones que impliquen desgaste, a diferencia del ventilador axial que se encuentra apoyado sobre rodamientos de bolas con una vida útil de 50,000 horas de servicio, por lo que después de este periodo debe ser reemplazado el ventilador axial.

Montaje

Suelte la abrazadera número 4 que sujeta a la tobera, a continuación, desatornille los tornillos de cabeza en estrella asegurados con tuerca, que mantienen unido el acople y separe las dos partes del acople halando la tobera hacia el lado izquierdo del banco. Paso seguido, desconecte los cables tanto del sensor cuentarrevoluciones como de energización del ventilador y finalmente extraiga ventilador y reemplácelo por uno de dimensiones igual, recuerde que comercialmente se encuentra baja las dimensiones ventilador axial 120x120x38 AC. A continuación repita el mismo proceso para ensamblar el ventilador nuevo. Preste atención especial a los cables de conexión del sensor.

Figura 2. Proceso de montaje del ventilador



Fuente: Elaboración propia con base en AMCA 210, Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. Illinois: AMCA Publications, 2016, 3 p.

ELEMENTOS DE MEDICIÓN

Manómetro diferencial

Verifique de periódicamente el nivel de fluido indicador del manómetro, y reajuste el cero del instrumento según sea necesario. Asegúrese de haber venteado el instrumento desconectando los tubos de conexión a proceso (entradas HIGH y LOW en la parte superior del manómetro). Agregue fluido solo si es necesario, utilizando los fluidos DWYER azul o rojo según corresponda. No utilice otros fluidos pues podrían dañar el material. Para limpieza use solo jabón neutro y agua, evitando solventes que puedan dañar el instrumento (vea Instalación). Limpie la perilla con un pincel pequeño y suave.

ATENCIÓN: Use solamente fluido rojo de peso específico 0,826 para el modelo MARK 25, es el modelo con el que cuenta el banco de pruebas.

En caso de ser necesario el desmontaje del manómetro diferencial siga las siguientes instrucciones

Instalación

Instale el Mark II en una superficie vertical adecuada. El ambiente debe estar libre de vapores de sustancias cloradas, o solventes tales como benceno, acetona, tetracloruro de carbono, etc. El instrumento soporta presiones internas de hasta 10 PSI, o 0,703 bar, y temperaturas de hasta 140°F ó 60°C. **NO EXCEDA ESTOS LÍMITES!**

Perfore dos orificios de 3,6 mm en línea vertical, separados por 100mm, e instale el instrumento con los tornillos autorroscantes provistos con él. Sin apretar demasiado, coloque el instrumento vertical con ayuda del nivel incluido en la parte inferior derecha del mismo. Verifique que ha quedado vertical y repita el proceso si es necesario.

Llenado

Gire en sentido antihorario la perilla de ajuste de cero hasta que se detenga; gírela nuevamente pero en sentido horario unas tres vueltas, de modo de dejar la posibilidad de ajuste en cualquier dirección. Retire el tapón de llenado y comience a llenar el manómetro lentamente hasta ver el líquido en las cercanías del cero de la escala. Ajuste exactamente el cero del instrumento girando la perilla según corresponda, y reponga el tapón de llenado. Si el ajuste preciso es imposible por exceso de llenado, retire nuevamente el tapón y extraiga el exceso introduciendo un limpiador de tubos, que absorba el exceso. Con el instrumento se suministra un tubo plástico flexible doble de 2,4 m juntamente con adaptadores para conexión a 1/8" NPT. Conecte el tubo marcado con una línea roja al la entrada de alta presión mas elevada a sensar. Repita el procedimiento con el tubo restante en la entrada de baja presión (LOW, a la derecha), y a la presión más baja a censar.

Tubo de Pitot

Es un instrumento primario por lo que no requiere mantenimiento

ELEMENTOS DE CONTROL

No requieren mantenimiento

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

No requieren mantenimiento

REFERENCIAS

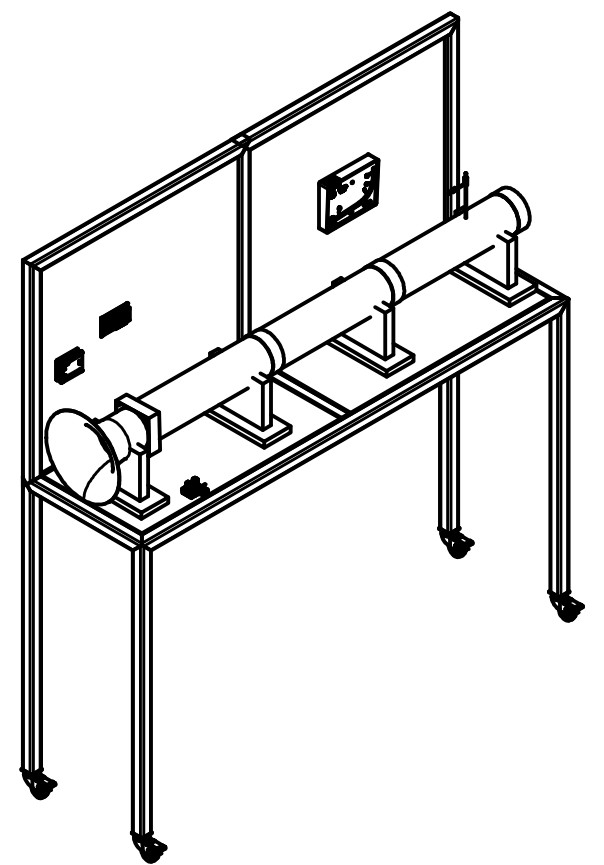
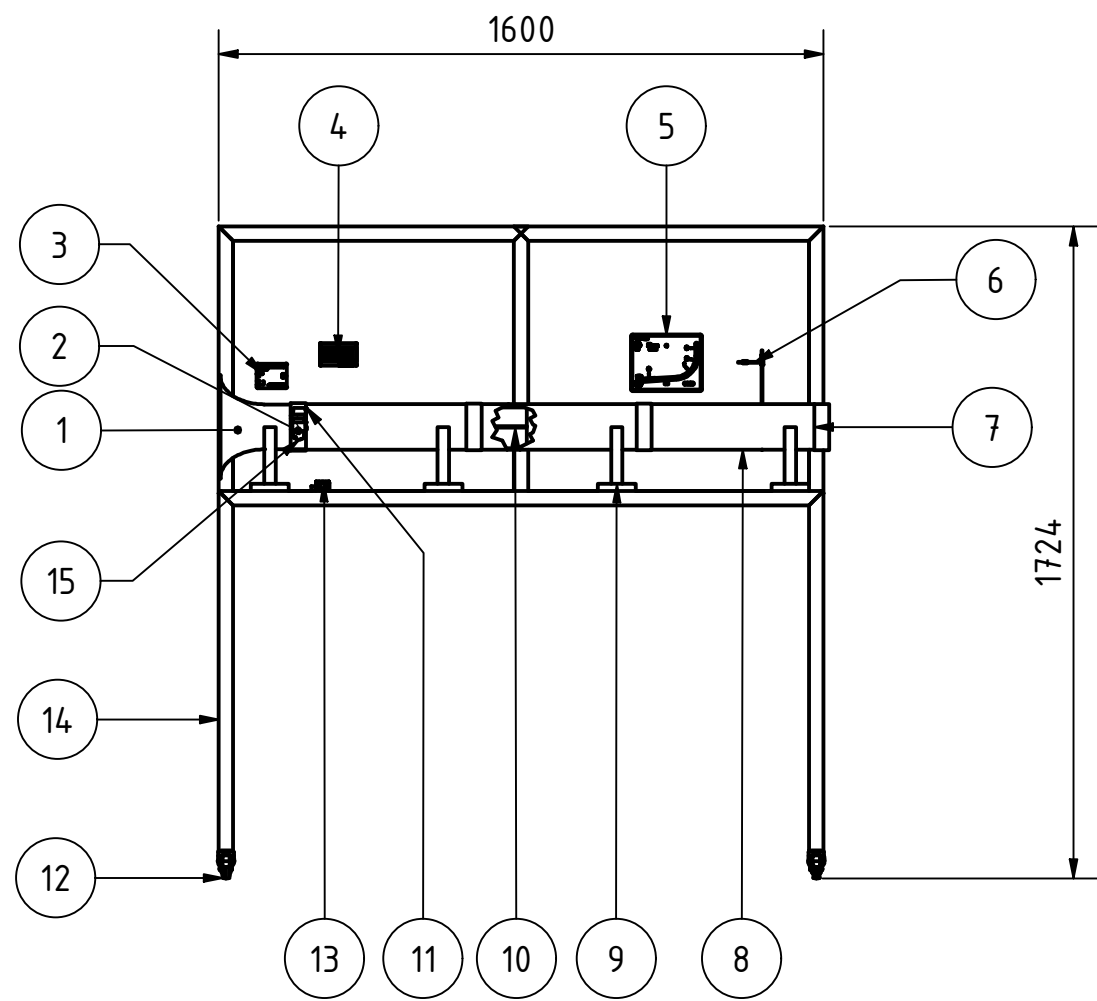
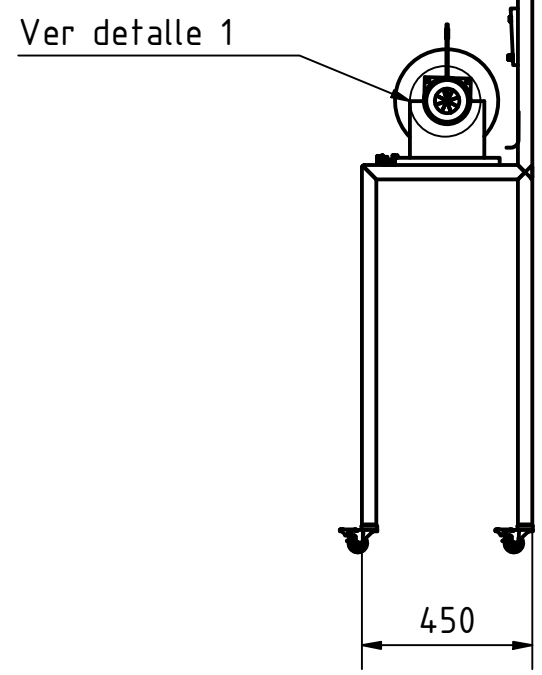
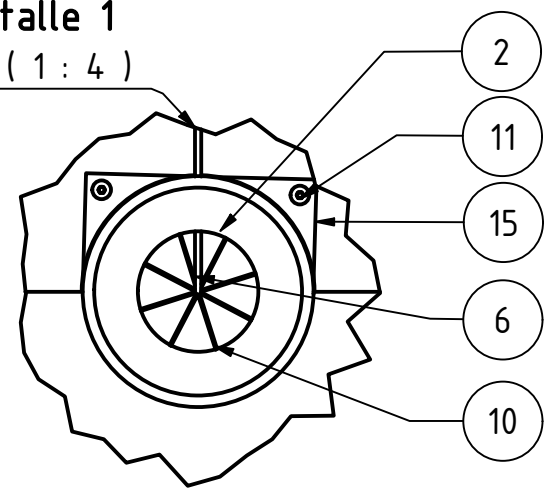
AMCA, Inc., 2016. AMCA 210 Laboratory Methods Of Testing Fans For Certified Aerodynamic Performance Rating. 12th ed. Arlington Heights, Illinois, US: AMCA Publications, p.79.

Dwyer, Inc., 2020. Dwyer Instruments Digital Catalog. 20th ed. Michigan, US: Dwyer Inc., pp.156-167.

Anexo B. Planos del banco didáctico de pruebas de ventilador axial

8 7 6 5 4 3 2 1

Detalle 1
Escala (1 : 4)




Nota: el ventilador a prueba se encuentra alojado en el interior del acople

LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Tobera	Farbicado Lámina calibre 18 soldado
2	1	Ventilador axial	Comercial Voltio-120x120x38
3	1	Microcontrolador	Comercial Arduino Uno
4	1	Indicador rpm	Comercial-Pantalla LCD 20x4
5	1	Manómetro diferencial	Comercial-Dwyer Mark II
6	1	Tubo de Pitot	Comercial-Dwyer serie 167-6
7	1	Estrangulador de flujo	Lámina calibre 18
8	1	Ducto	Ácrilico espesor 3 mm
9	4	Base	Fabricada madera prensada
10	1	Enderezador de flujo	Ácrilico espesor 1 mm
11	4	Tornillo de estrella	Comercial SM 5x40

LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
12	4	Rueda giratoria	Comercial-con freno 50mm
13	1	Variador rpm	Variador de tensión 110/250 VAC
14	2	Tubo cuadrado	38 x 38 x 1.2mm C18 x 6m
15	1	Acople ventilador	Lámina calibre 18 soldado



**FACULTAD
INGENIERÍA
MECÁNICA**
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

Nombre	Código	Fecha
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Celis	Tutores	22/09/2020
Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Celis	Tutores	22/09/2020
Fabricó: José Federico Hernández Rojas	2165475	22/09/2020

ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm
ACABADO SUPERFICIAL: N6
TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1
ANGULAR: ± 1°

Proyecto:
Banco de pruebas de ventilador axial

Asignatura:
Trabajo de grado

Nombre de la pieza:
Ensamble final

Código de la pieza:
1

Nota:

Dirección acceso: D:\BanPrueR\Ensamble final.iam

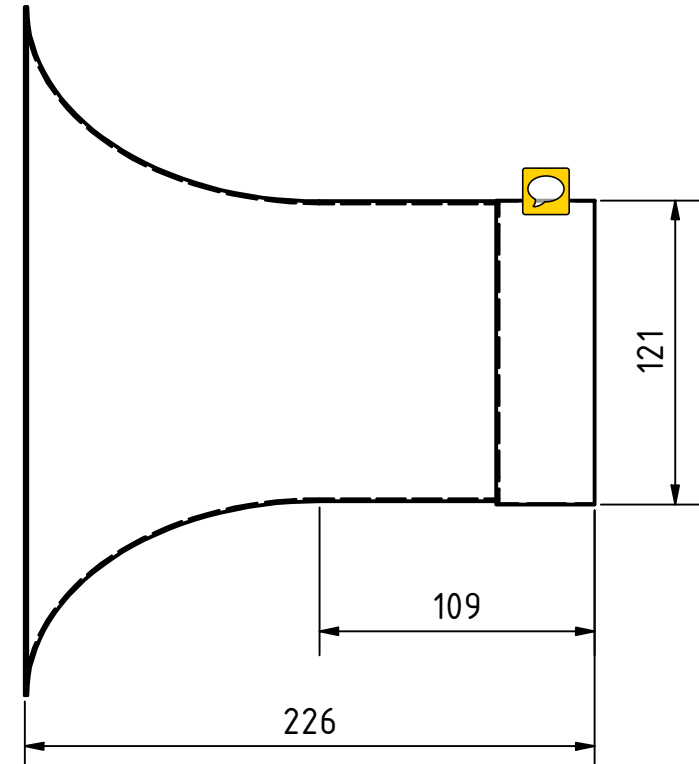
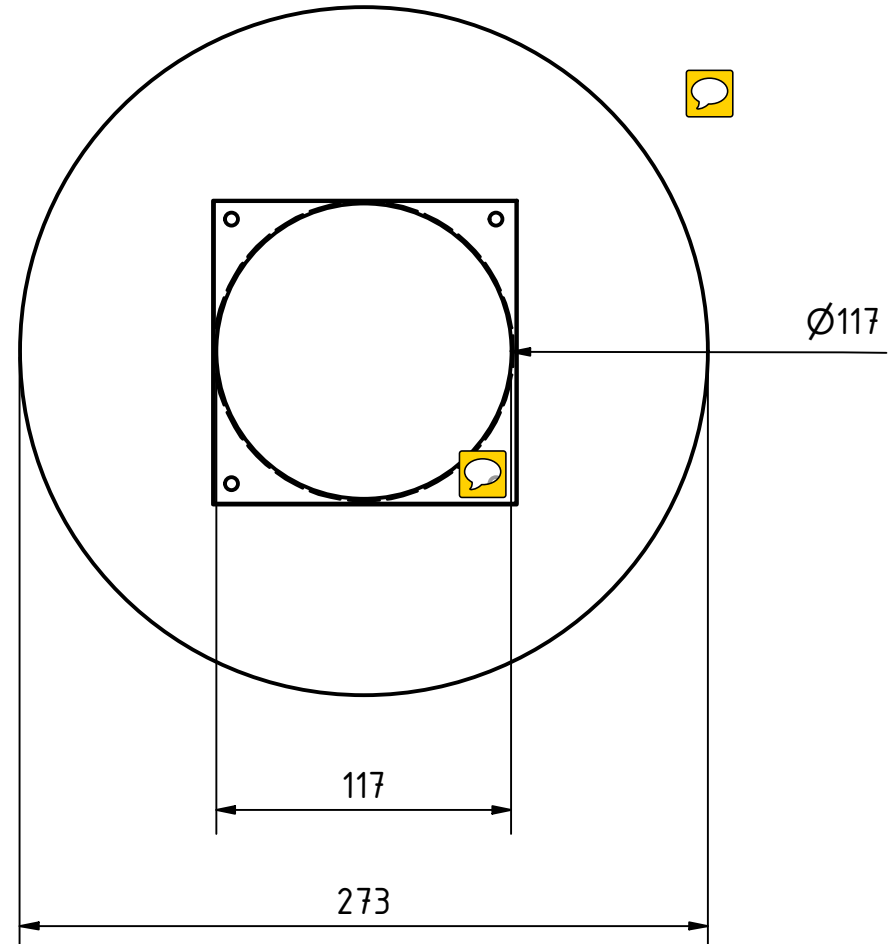
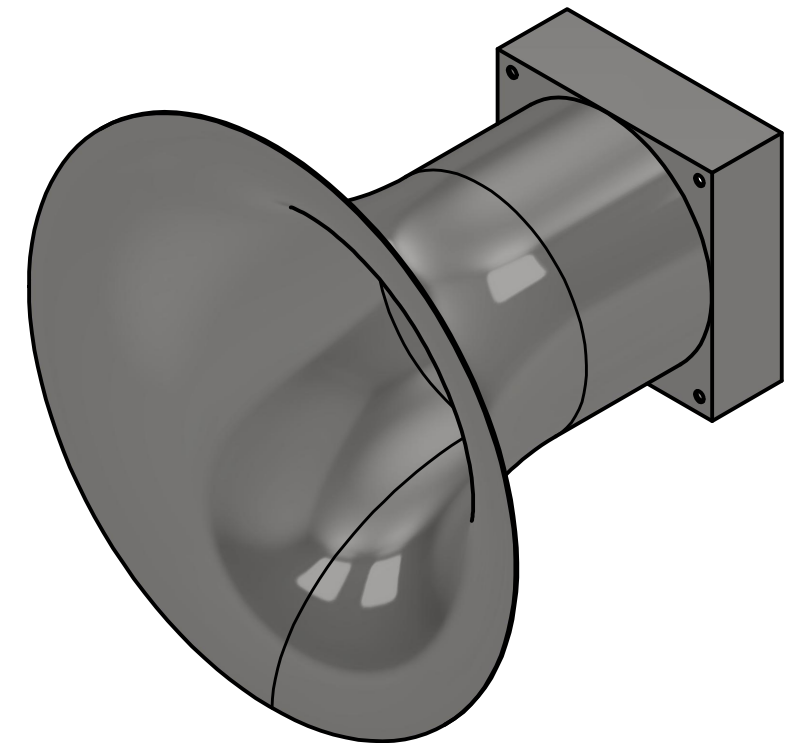
Material:
Según el indicado en la lista de piezas

Formato: A3
Escala: 1 : 20
Representación:

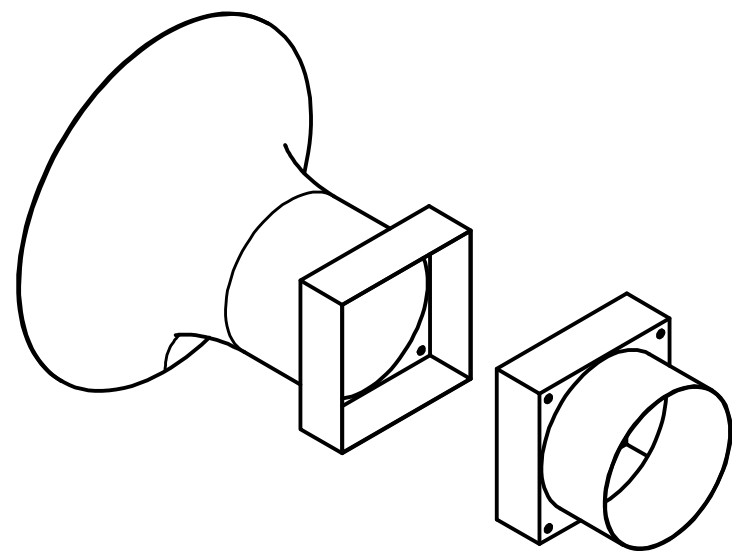
Peso: N/D

Hoja 1 de 8

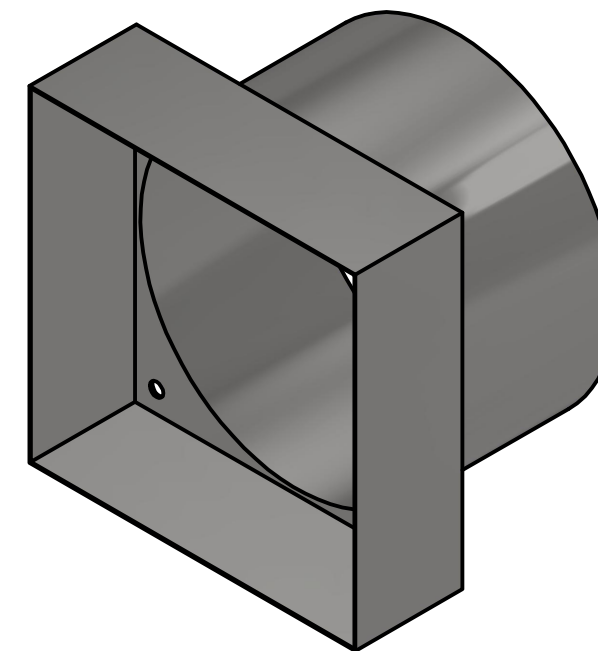
8 7 6 5 4 3 2 1



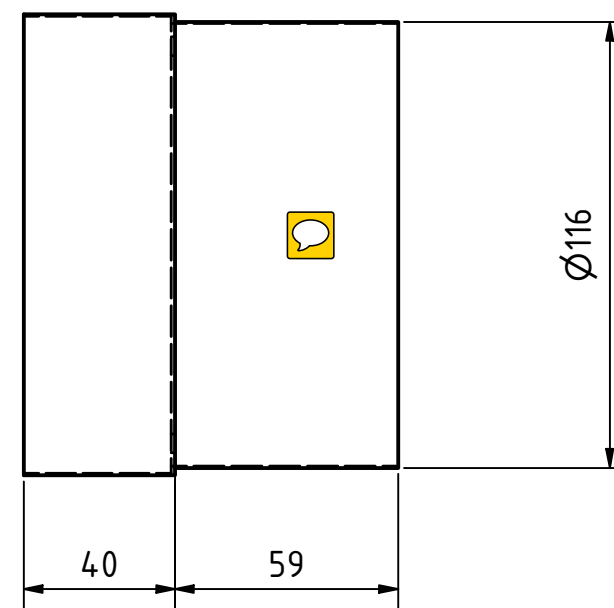
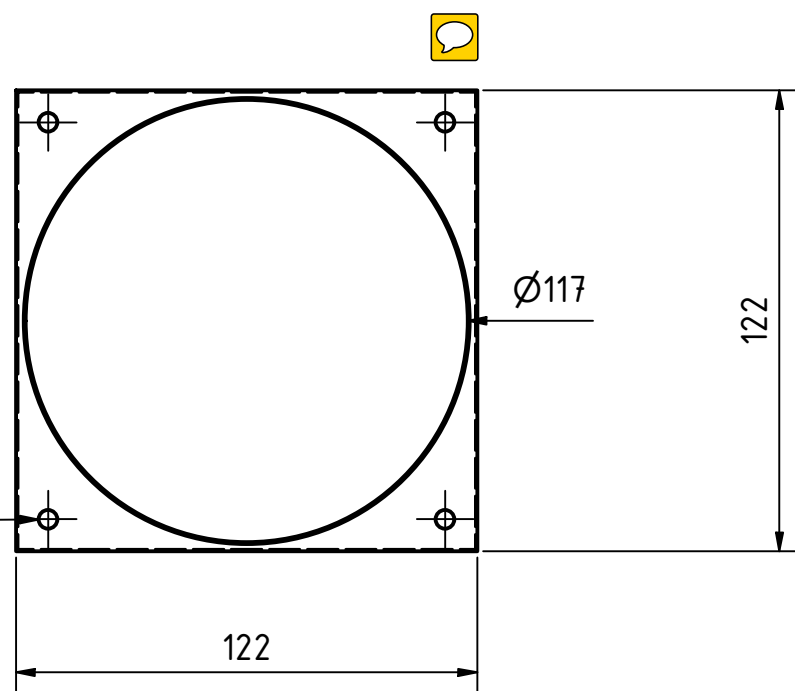
			ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO. SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm ACABADO SUPERFICIAL: N6 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1 ANGULAR: ± 1°		Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>			Nombre	Código	Fecha	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Material: Lámina de calibre 18		Asignatura: Trabajo de grado	
Nombre	Código	Fecha																
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Fabricó: José Federico Hernández Rojas</td> <td></td> <td>22/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>			Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Fabricó: José Federico Hernández Rojas		22/09/2020	Formato: A3 Escala: 1 : 3 Peso: N/D		Nombre de la pieza: Tobera				
Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																
Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																
Fabricó: José Federico Hernández Rojas		22/09/2020																
			Representación: Hoja 2 de 8		Código de la pieza: 1.1													
			Dirección acceso: D:\BanPrueR\Tobera.jpt		Nota:													



Nota: el acople está compuesto por dos partes, una se inserta dentro de la otra. La primera está fija a la tobera y la segunda se inserta a través de diámetro menor dentro del ducto.



4 agujeros de $\varnothing 5,00$ -1,00 Profundidad




FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA
 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO
 SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm
 ACABADO SUPERFICIAL: N6
 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1
 ANGULAR: $\pm 1^\circ$

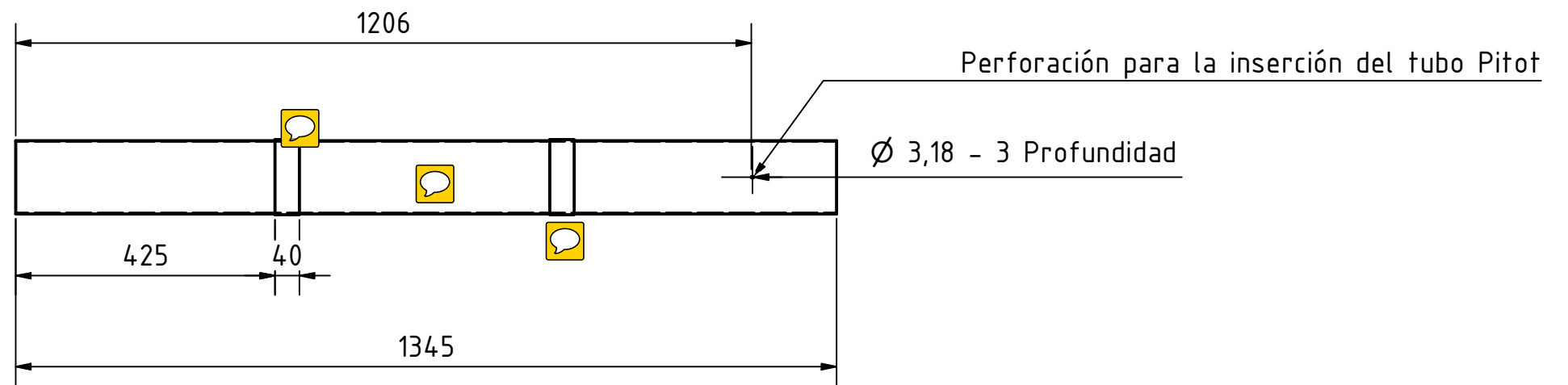
Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial
Asignatura: Trabajo de grado

	Nombre	Código	Fecha
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020
Verificó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Aprobó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Fabricó:	José Federico Hernández Rojas	2165475	22/09/2020


Material: Lámina de calibre 18
Formato: A3
Escala: 1 : 2
Representación:
Peso: N/D
 Hoja 3 de 8

Nombre de la pieza: Acople
Código de la pieza: 1.2
Nota:
Dirección acceso: D:\BanPrueR\Acople del ventilador.ipf

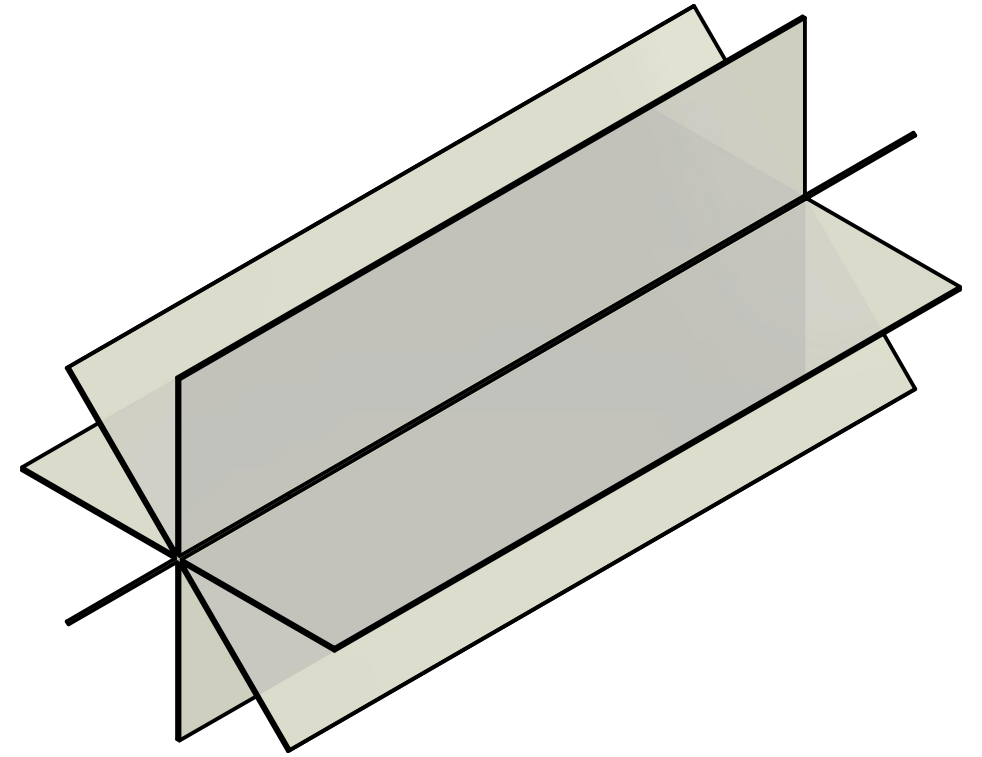
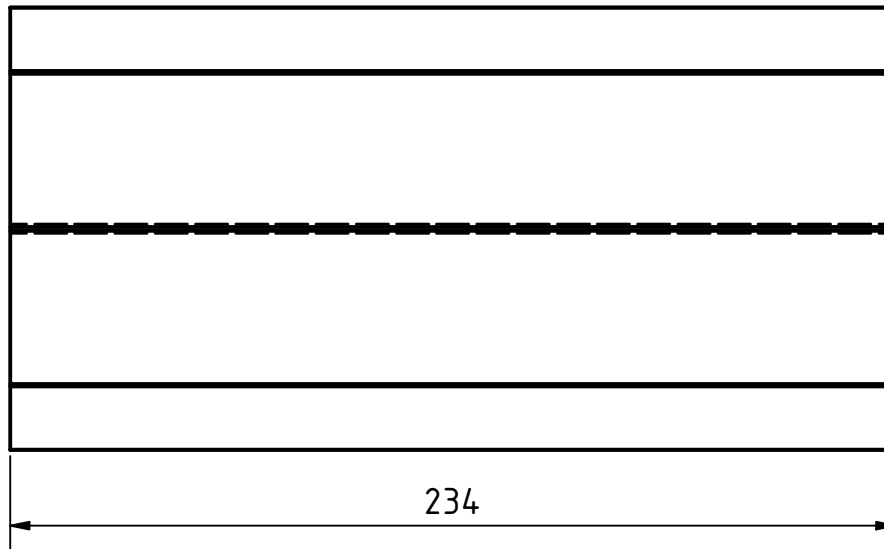
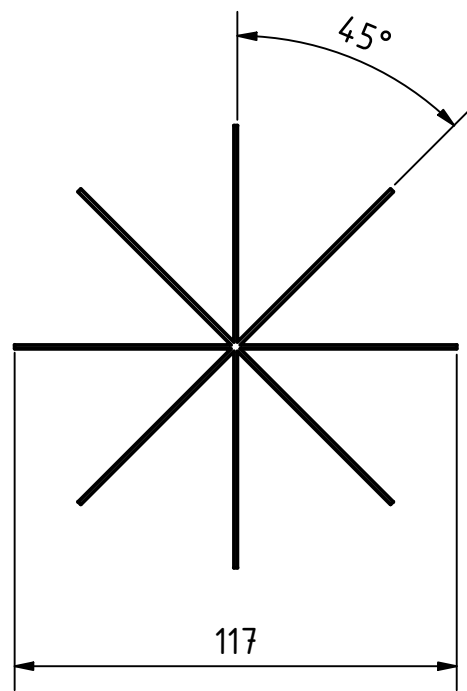
Detalle c (1 : 3)



Nota: la longitud del ducto se obtuvo con la unión de 3 secciones de menor tamaño

	ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm ACABADO SUPERFICIAL: N6 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1 ANGULAR: ± 1°		Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial																				
	Material: Acrílico de 3 mm de espesor		Asignatura: Trabajo de grado																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>2165475</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>2165475</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>2165475</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Fabricó: José Federico Hernández Rojas</td> <td>2165475</td> <td>22/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>	Nombre	Código	Fecha	Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020	Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Fabricó: José Federico Hernández Rojas	2165475	22/09/2020	Formato: A3 Escala: 1 : 10 Representación: Hoja 4 de 8	Nombre de la pieza: Ducto Código de la pieza: 1.3 Dirección acceso: D:\BanPrueR\Ducto.ipt
Nombre	Código	Fecha																					
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020																					
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020																					
Diseño: José Federico Hernández Rojas	2165475	18/09/2020																					
Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																					
Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																					
Fabricó: José Federico Hernández Rojas	2165475	22/09/2020																					

Nota: el enderezador de flujo se compone de 8 láminas radiales cada 45°.




**FACULTAD
INGENIERÍA
MECÁNICA**
 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA

ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO
 SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm
 ACABADO SUPERFICIAL: N6
 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1
 ANGULAR: $\pm 1^\circ$

Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial
Asignatura: Trabajo de grado

	Nombre	Código	Fecha
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Verificó:	Ing Yina Quintero-Ing. Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Aprobó:	Ing Yina Quintero-Ing. Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Fabricó:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	22/09/2020

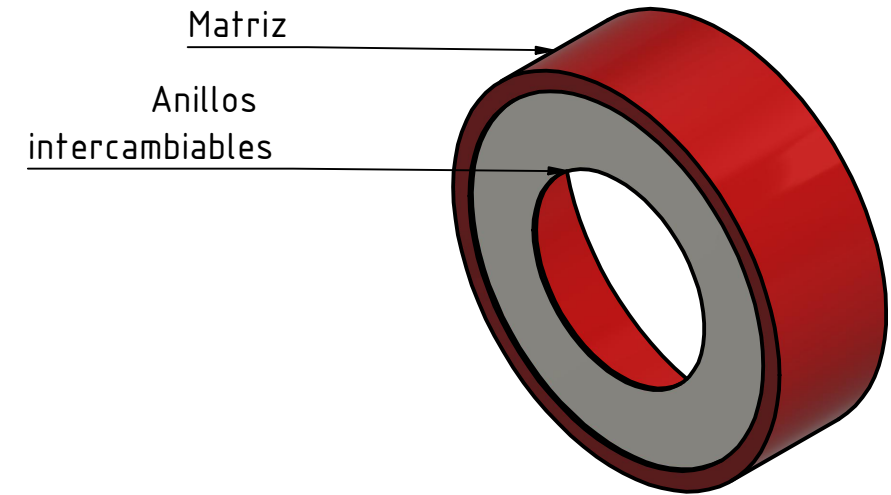
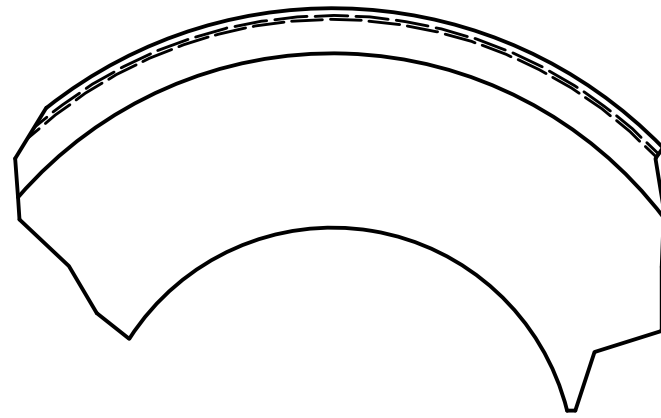
Material: Acrílico de 1 mm de espesor
Formato: A3
Escala: 1 : 2
Representación:
Peso: N/D
 Hoja 5 de 8

Nombre de la pieza: Enderezador de flujo
Código de la pieza: 1.4
Nota:
Dirección acceso: D:\BanPrueR\Enderezador.ipf

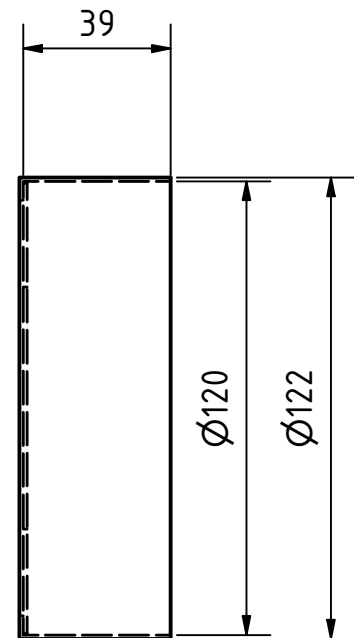
Detalle B.

Muestra como los anillos se alojan en el interior del estrangulador y que soportados por el borde interior de la matriz.

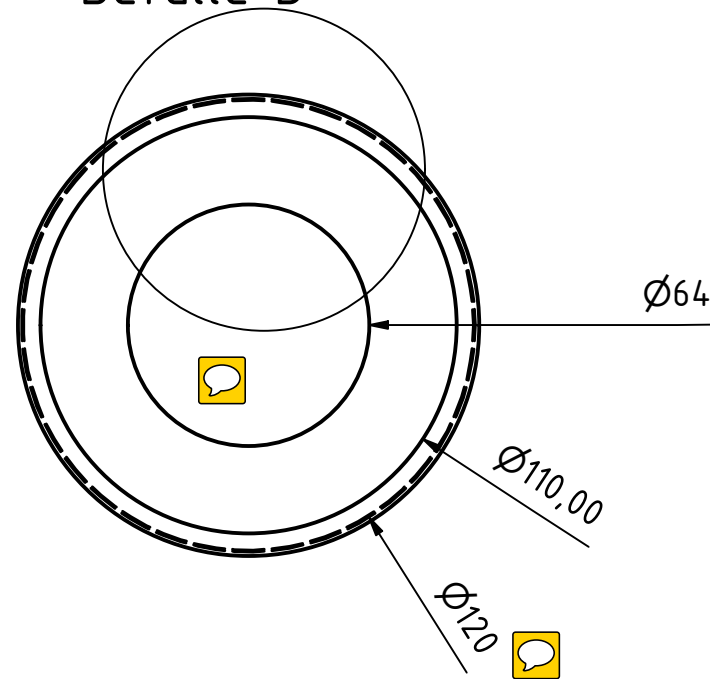
K (1 : 1)



Nota: El estrangulador se compone de una matriz (color rojo) y anillos intercambiables de diferente apertura (color gris). Estos se extraen por el interior del estrangulador.



Detalle B



FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS TUNJA

ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm
ACABADO SUPERFICIAL: N6
TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1
ANGULAR: ± 1°

Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial

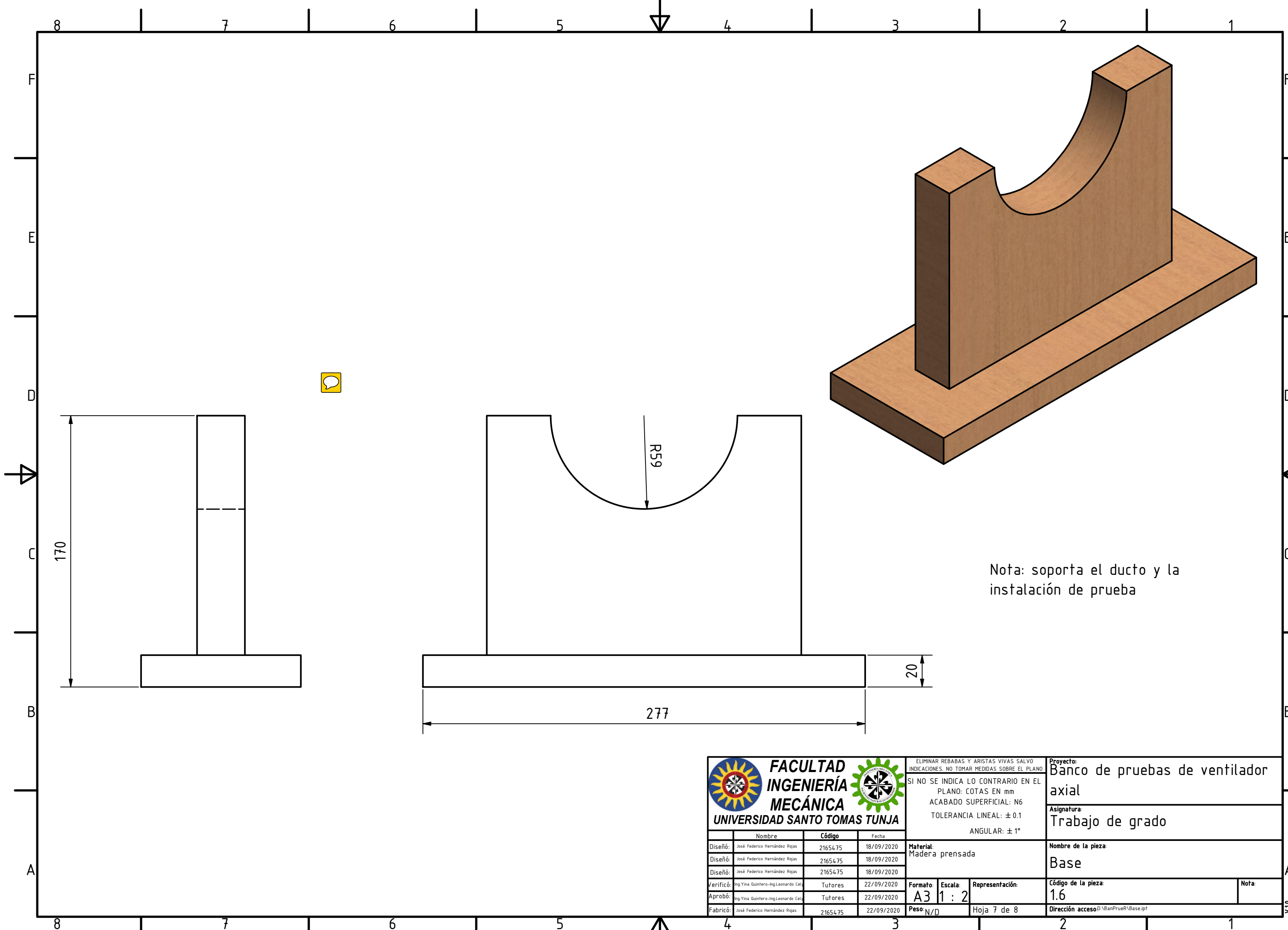
Asignatura: Trabajo de grado

Nombre de la pieza: Estrangulador de flujo


Nombre	Código	Fecha
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020
Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020
Fabrió: José Federico Hernández Rojas	21654.75	22/09/2020

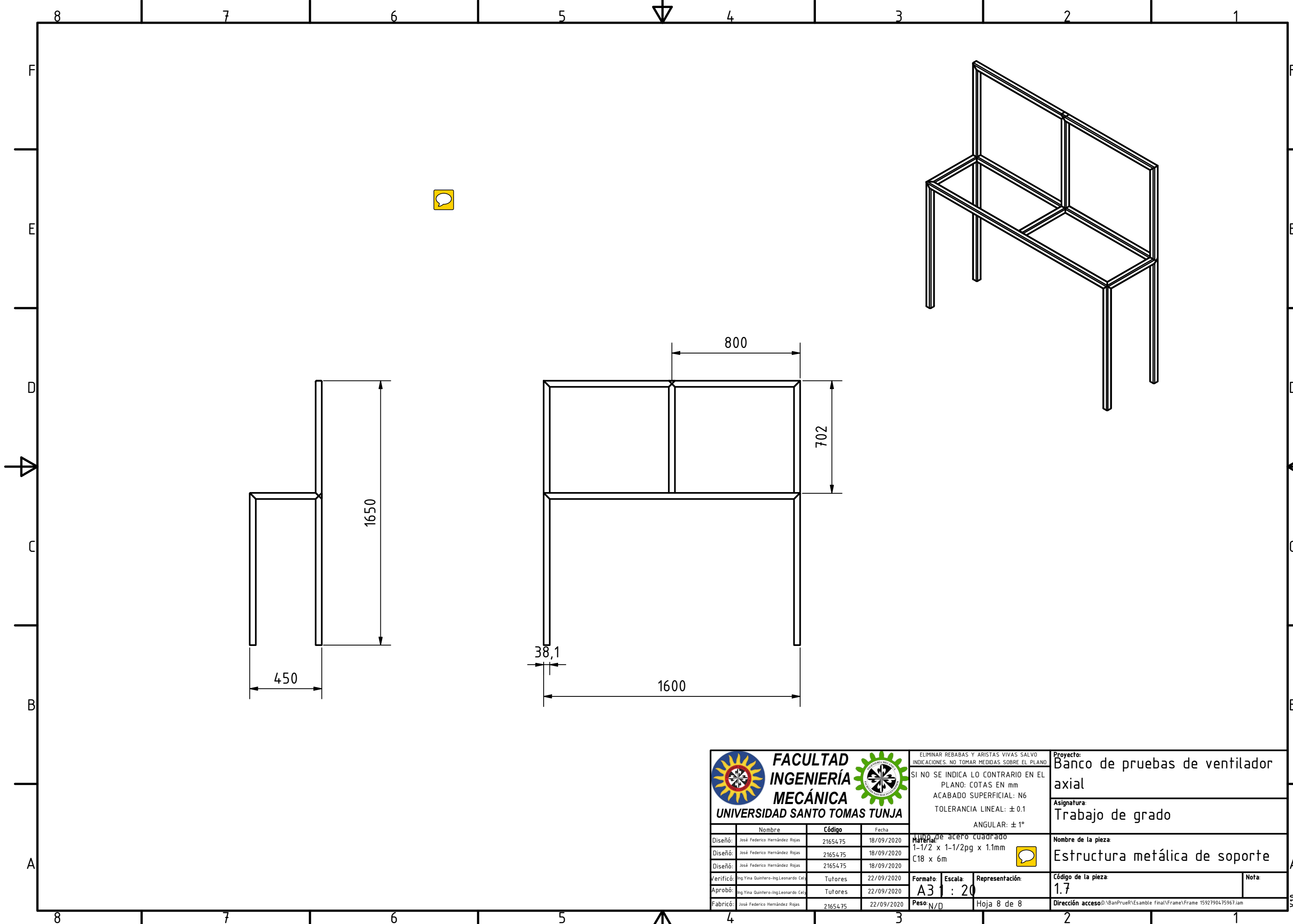
Material: Lámina calibre 18
Formato: A3
Escala: 1 : 2
Representación:
Peso: N/D
Hoja 6 de 8

Código de la pieza: 1.5
Nota:
Dirección acceso: D:\BanPrueR\Estrangulador de flujo.ipf



Nota: soporta el ducto y la instalación de prueba

			ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm ACABADO SUPERFICIAL: N6 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1 ANGULAR: $\pm 1^\circ$			Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño: José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>			Nombre	Código	Fecha	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Material: Madera prensada			Asignatura: Trabajo de grado		
Nombre	Código	Fecha																		
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																		
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																		
Diseño: José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verificó:</th> <th>Tutores</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>			Verificó:	Tutores	Fecha	Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Formato: A3 Escala: 1 : 2 Representación:			Nombre de la pieza: Base					
Verificó:	Tutores	Fecha																		
Verificó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																		
Aprobó: Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																		
Fabricó: José Federico Hernández Rojas Código: 21654.75 Fecha: 22/09/2020			Peso: N/D Hoja 7 de 8			Código de la pieza: 1.6 Nota: Dirección acceso: D:\BanPrueR\Base.ipf														



			ELIMINAR REBABAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO. SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm ACABADO SUPERFICIAL: N6 TOLERANCIA LINEAL: ± 0.1 ANGULAR: $\pm 1^\circ$		Proyecto: Banco de pruebas de ventilador axial																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño:</td> <td>José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño:</td> <td>José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Diseño:</td> <td>José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>18/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Verificó:</td> <td>Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Aprobó:</td> <td>Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel</td> <td>Tutores</td> <td>22/09/2020</td> </tr> <tr> <td>Fabricó:</td> <td>José Federico Hernández Rojas</td> <td>21654.75</td> <td>22/09/2020</td> </tr> </tbody> </table>				Nombre	Código	Fecha	Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020	Verificó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Aprobó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020	Fabricó:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	22/09/2020	Materia: 1-1/2 x 1-1/2pg x 1.1mm C18 x 6m		Asignatura: Trabajo de grado	
	Nombre	Código	Fecha																															
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																															
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																															
Diseño:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	18/09/2020																															
Verificó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																															
Aprobó:	Ing Yina Quintero-Ing Leonardo Cel	Tutores	22/09/2020																															
Fabricó:	José Federico Hernández Rojas	21654.75	22/09/2020																															
Formato: A3 Escala: 1:20 Peso: N/D			Representación: Hoja 8 de 8		Nombre de la pieza: Estructura metálica de soporte																													
			Código de la pieza: 1.7		Nota:																													
			Dirección acceso: D:\BanPrueR\Esamble final\FFrame\FFrame 1592790475967.iam		V:1.0																													

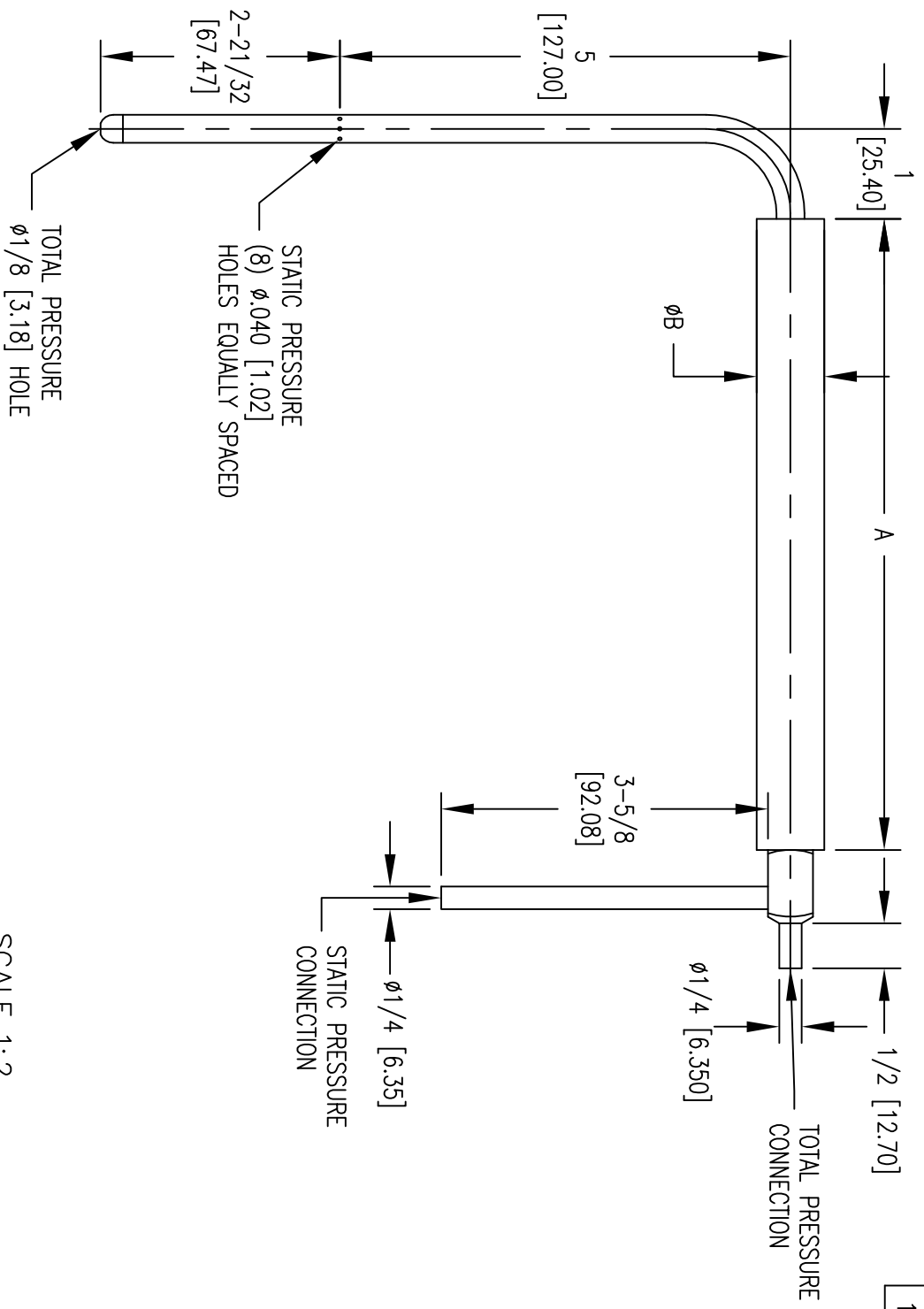
Anexo C. Costo final del proyecto

BANCO DE PRUEBAS DE VENTILADOR AXIAL
 José Federico Hernández Rojas – USTA Tunja

COSTO TOTAL DEL BANCO DE PRUEBAS DE VENTILADOR AXIAL							
No.	Elemento	Descripción	Cantidad	Fuente	Precio unitario	Precio total	
1 Elementos estructurales							
1.1	Perfil	Tubo cuadrado 1-1/2 x 1-1/2pg x 1.1mm C18 x 6m	2	Comprado	30.900	61.800	
1.2	Ruedas	Freno rueda rodaja hule termoplast 2 Pulg Roja	2	Comprado	10.800	21.600	
1.3	Ruedas con freno	Rueda giratoria rodaja Hule Termoplast 2" Roja	2	Comprado	13.000	26.000	
1.4	Tablero	1/4 tablero MPD 15 mm x 2.15x1,23 m	1	Comprado	137.800	137.800	
1.7	Anclaje del ducto a la mesa	En madera contrachaba de 15mm de espesor	4	Fabricado	60.000	60.000	
						Subtotal	307.200
2 Elementos de instalación y configuración							
2.1	Tobera	Tobera de lámina de calibre 18	1	Fabricado	30.000	30.000	
2.2	Ventilador	Ventilador axial de 120 mm de diametro 120x120x38 mm AC	1	Comprado	26.000	26.000	
2.3	Ducto	3 tubos de 45 cm de acrílico de 3mm de espesor	1	Fabricado	120.000	120.000	
2.4	Enderezador de flujo	Se fabrica en acrílico	1	Fabricado	50.000	50.000	
2.5	Estrangulador de flujo	Se fabrica en impresión 3d	1	Fabricado	35.000	35.000	
2.6	Acople ventilador ducto	Lámina calibre 18	1	Fabricado	17.500	17.500	
2.7	Acople tobera ventilador	Lámina calibre 18	1	Fabricado	27.500	27.500	
						Subtotal	306.000
3 Elementos de medición							
3.1	Manómetro	Manómetro Dwyer Mark II 25 de tubo de columna de líquido inclinado en U rango de 0-3" columna de agua	1	Comprado	468.746	468.746	
3.2	Tubo de Pitot	Tubo de Pitot Dwyer serie 167-6 , diámetro 1/8" , 6" de longitud de inserción, punta 1 1/2"	1	Comprado	642.968	642.968	
3.3	Cuenta revoluciones	KY-003 Módulo de Sensor Magnético por efecto Hall Sensor de efecto hall	1	Comprado	10.000	10.000	
						Subtotal	1.121.714
4 Elementos de control							
4.1	Variador de velocidad	Varidor de velocidad electrónico Ac 6,0a.	1	Comprado	165.132	165.132	
4.2	Microcontrolador	Arduino UNO	1	Comprado	28.000	28.000	
4.3	Pantalla LCD	Pantalla Lcd 20x4 luz verde	1	Comprado	22.000	22.000	
4.4	Adaptador pantalla	Modulo adaptador interfaz I2C para pantalla Lcd 20x4	1	Comprado	5.500	5.500	
						Subtotal	220.632
5 Otros							
5.1	Transportes y envíos	Desplazamiento a las industrias y/o envíos de partes	N/A	N/A	N/A	300.000	300.000
						Subtotal	300.000
COSTO TOTAL (COP)							2.255.546

Anexo D. Plano e información técnica del tubo de Pitot

MODEL #	DIM A	DIM B
160-96	96 [2438.40]	3/4 [19.05]
160-120	120 [3048.00]	3/4 [19.05]
160-168	168 [4267.20]	1 [25.40]
160-216	216 [5486.40]	1 [25.40]



SCALE 1:2

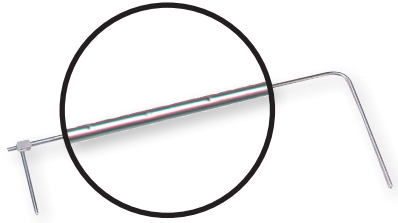
STANDARD TOLERANCES UNLESS NOTED:
 ALL FRACTIONAL DIMENSIONS $\pm 1/64$
 ALL DECIMAL DIMENSIONS \pm
 ALL ANGLES $\pm 0^\circ$

NO.		CHANGES		BY/DATE	APPD	ACADR14
DATE		NAME		160 PITOT TUBE WITH STIFFENER		
DWN BY						
CHKD						
MATERIAL		FR. NO.				
FINISH		Dwyer Instruments, Inc. Michigan City, Indiana 46360 U.S.A.				

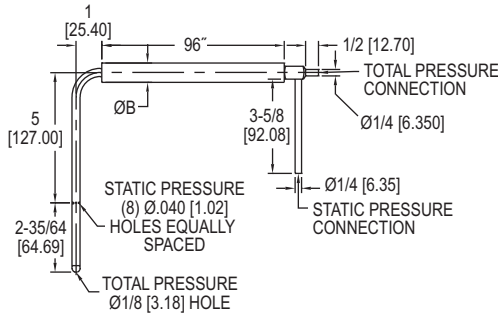
NOTICE: This drawing and the principles and elements of design embodied therein are the exclusive property of DWYER INSTRUMENTS, INC. and are not to be communicated, disclosed, reproduced, or in any way used or employed without the written consent of such corporation and must not be submitted to outside parties for examination without the written consent of said corporation.

STAINLESS STEEL PITOT TUBE

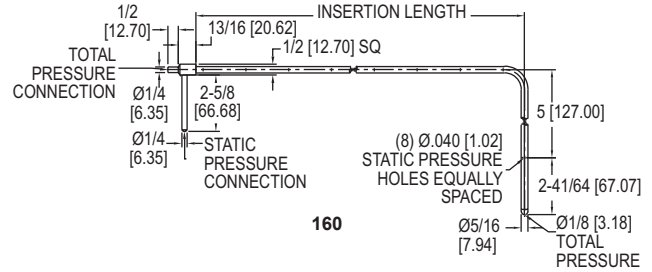
ASME Design Meets AMCA and ASHRAE Codes



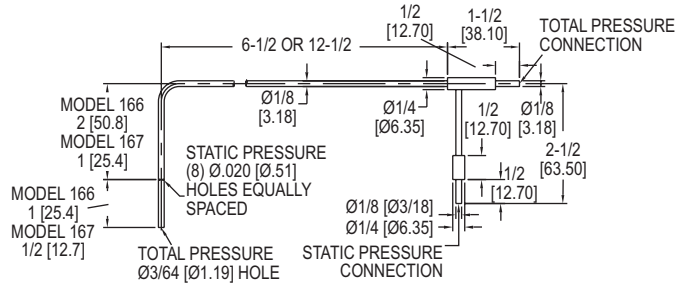
Standard Model 160 pitot tube



160
96" and longer with stiffener



160



166/167

The **Series 160 Stainless Steel Pitot Tube** is constructed from corrosion resistant stainless steel with permanently etched insertion depth graduations for a lifetime of service. The static pressure port is parallel to the sensing tube to allow quick, easy alignment of the tube with air flow. A universal model fits the user supplied 3/4" schedule 40 pipe in any length.

FEATURES/BENEFITS

- Low sensitivity to misalignment up to 15 degrees
- No calibration needed due to ASHRAE tip design
- Silver soldered connections for leak-proof operation
- 5/16" models rated to 1500°F (815.5°C)

APPLICATIONS

- Monitor or control air velocity or air flow when combined with differential pressure gage, switch, or transmitter

ACCESSORIES

Model	Description
A-156	Flange mounting plate 1/2" female NPT
A-158	Split flange mounting. Can be added to any Dwyer® No. 160 standard pitot tube. Cadmium plated steel. Gasket is pattern for mounting holes. Secure flange loosely to tube, adjust tube depth and tighten screws. Gasket of 1/16" Neoprene fits tightly around tube and against duct for leak-proof seal. Nuts, washers included.
A-159	Mounting gland. Versatile adapter slips on any Series 160, 5/16" standard pitot tube made after Dec. 1990. Two-part stainless steel fitting slides over tube and provides permanent, secure mounting. Where duct interior is accessible, use the washers and jam nut supplied. For blind applications or in thicker materials, use model A-156 flange mounting plate. Once tube is adjusted to proper depth and angle, tighten smaller hex bushing to lock position. Graphite bushing inside assures leak-proof seal even at higher temperatures. TFE bushing also available. Note: For full insertion with this fitting, order next longer pitot tube. A-159 mounting gland is used for both duct mounting and flange mounting.
A-160-CASE A-397	Carrying case for pitot tubes up to 48" Step drill. For fast, convenient installation of pitot tubes in sheet metal ducts. No center punch needed; automatic de-burring. Drills six sizes from 3/16"-1/2" in 1/16" increments.

MODEL CHART			
Standard 5/16" Diameter Model	Insertion Length	Longer Length with Stiffener Model	Insertion Length
160-8	8-5/8"	160-96	96"
160-12	12-5/8"	Pocket Size 1/8" Diameter Model	Insertion Length
160-18	18-5/8"	166-6	6"
160-24	24-5/8"	166-12	12"
160-36	36-5/8"	167-6	6"
160-48	48-5/8"	167-12	12"
160-60	60-5/8"		
Model	Description		
160-KIT	Kit containing 160-18, 160-24, 160-36, 160-48, and carrying case		

OPTIONS	
To order add suffix:	Description
-CF	1/8" male NPT compression fitting, mounting option for Series 166/167
Example: 166-6-CF	



A-158



A-159



To flange mount, the A-159 must be used with the A-156 flange mounting plate.

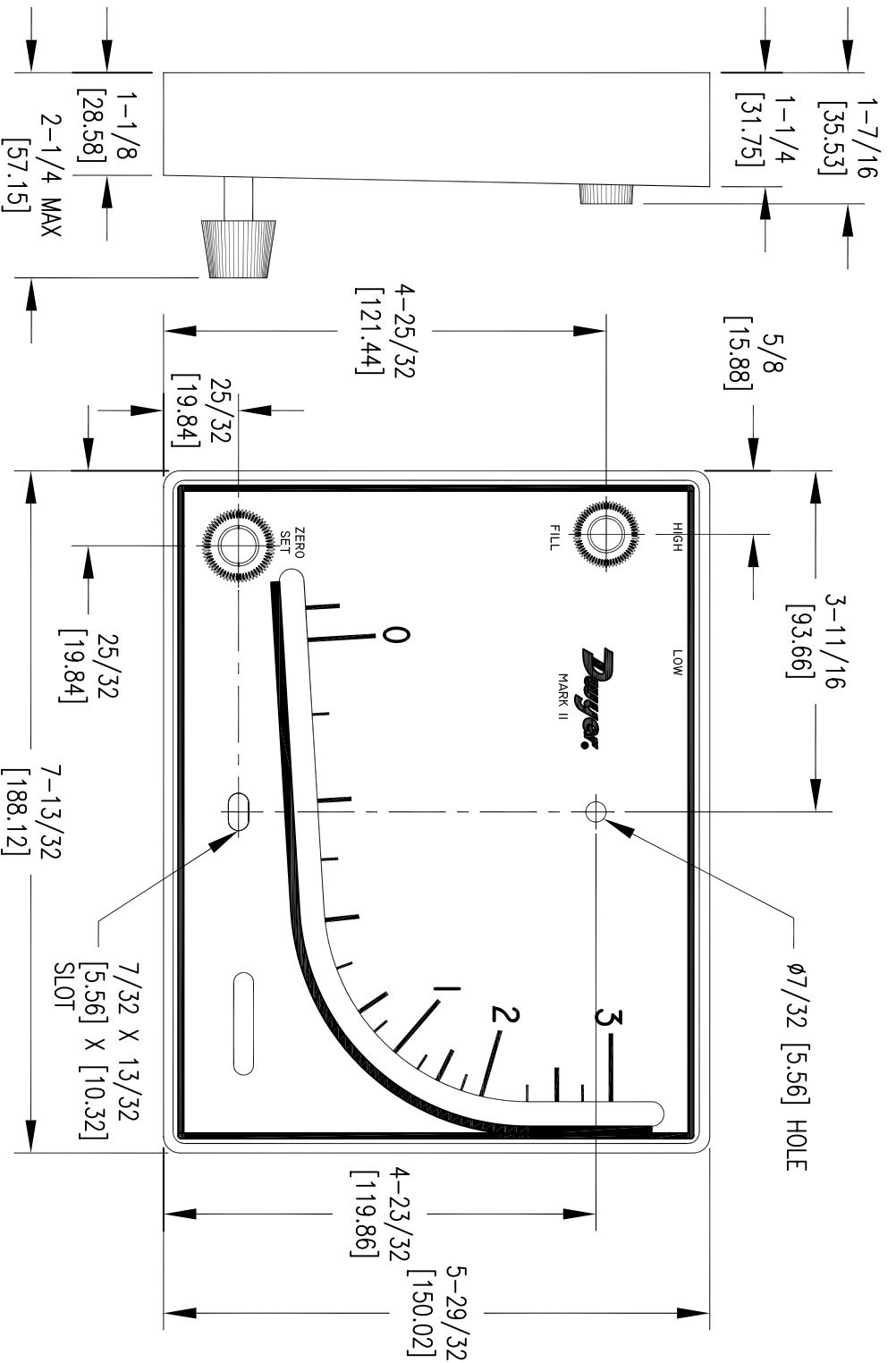


A-160-CASE



A-397

Anexo E. Plano e información técnica del manómetro diferencial Mark II 25



STANDARD TOLERANCES UNLESS NOTED:
 ALL FRACTIONAL DIMENSIONS ±1/64
 ALL DECIMAL DIMENSIONS ±.005
 ALL ANGLES ±1°

SCALE 1:2

NO.		DATE		NAME		MATERIAL	
		DWN BY		MK II 25 MANOMETER		FINISH	
		CHKD				Dwyer INSTRUMENTS, INC.	
		APPD				MICHIGAN CITY, INDIANA 46360 U.S.A.	
CHANGES		BY/DATE		ACADR14		FR. NO.	

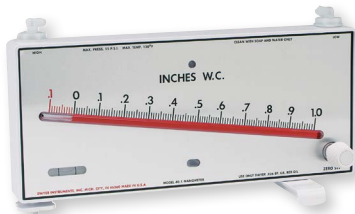
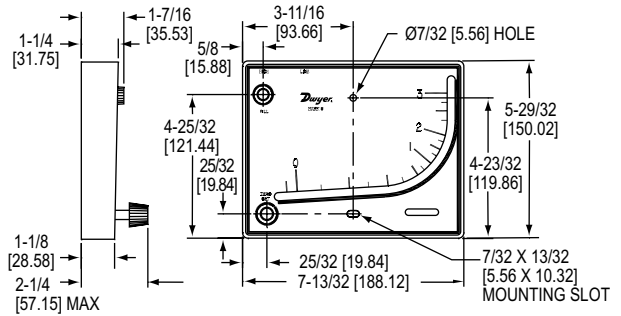
NOTICE: This drawing and the principles and elements of design embodied therein are the exclusive property of DWYER INSTRUMENTS, INC. and are not to be communicated, reproduced, copied, or used in any way without the written consent of such corporation and must not be submitted to outside parties for examination without the written consent of said corporation.

MARK II MOLDED PLASTIC MANOMETERS

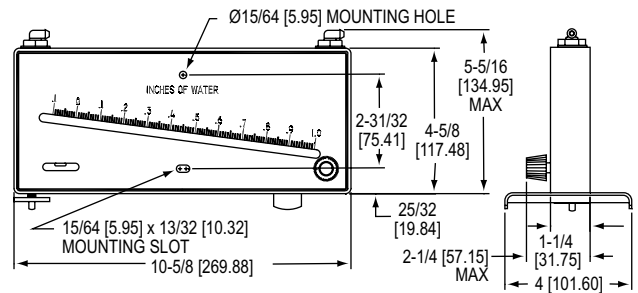
3% Accuracy For Stationary And Portable Applications



Mark II Model No. 25 inclined-vertical manometer.
(shown with optional A-612 portable stand)



Mark II Model No. 40-1 inclined manometer



Series Mark II Molded Plastic Manometers are of the inclined and inclined-vertical types. The curved inclined-vertical tube of the Model 25 gage provides higher ranges with more easily read increments at low readings. The Model 25 is excellent for general purpose work. The Model 40 inclined gage provides linear calibration and excellent resolution throughout its range. The Model 40 is ideally suited for air velocity and air filter gage applications. Both gage types are capable of pressure measurements above and below atmospheric as well as differential pressure measurements. Included with each Mark II manometer are two tubing connectors for 1/8" pipe or sheet metal ducts, two mounting screws, 1 ounce bottle of indicating fluid, red and green pointer flags and complete instructions.

The Model 25 also includes 8' of flexible double column plastic tubing. Portable operation of the Model 25 is made possible by the use of the optional A-612 portable stand. A short piece of tubing can be slipped over the Model 25 pressure connections to contain the gage fluid in transit.

The Model 40 contains two 4-1/2' lengths of clear plastic tubing, a plastic swing-out stand and leveling screw for portable operation. It also features convenient rapid shutoff pressure connections and integral overpressure safety traps.

FEATURES/BENEFITS

- Broad ranging in easy to read calibrated increments
- Gages ideally suited for general measurements and specific air applications
- Compact, stationary or portable device, make it a simple to use tool for pressure measurement in OEM or user applications

APPLICATIONS

- Paint booths
- Air velocity measurement
- Air filter gage

OEM SPECIALS

All Dwyer® Mark II molded plastic manometers can be supplied in OEM quantities with your name or special graphics and scales.

ACCESSORIES

Model	Description
A-612	Portable stand
A-606	Air filter kit
A-480	Plastic static pressure tip
A-489	4" straight static pressure tip with flange

SPECIFICATIONS

INCLINED/VERTICAL

Accuracy: ±3% FS.

Temperature Limits: 140°F (60°C).

Pressure Limits: 10 psi (70 kPa).

Weight: 1.04 lb (472 g).

Agency Approvals: Meets the technical requirements of EU Directive 2011/65/EU (RoHS II).

INCLINED

Accuracy: ±3% FS.

Temperature Limits: 150°F (65°C).

Pressure Limits: 15 psi (100 kPa).

Scale Length: Approx. 8-1/4" (21 cm).

Weight: 1.23 lb (558 g).

Agency Approvals: Meets the technical requirements of EU Directive 2011/65/EU (RoHS II).

MODEL CHART

Model	Range	Fluid Used
Mark II 25	0-3 in w.c	Red fluid, .826 s.g.
Mark II 26	0-7 in w.c.	Blue oil, 1.91 s.g.
Mark II 27*	0-7000 fpm	Red fluid, .826 s.g.
Mark II MM-80	0-80 mm w.c.	Red fluid, .826 s.g.
Mark II M-700PA	10-0-700 Pa	Red fluid, .826 s.g.
Mark II 40-1	.1-0-1.0 in w.c.	Red fluid, .826 s.g.
Mark II 40-25MM	0-26 mm w.c.	Red fluid, .826 s.g.
Mark II 40-250PA	10-0-250 Pa	Red fluid, .826 s.g.
Mark II 41-60MM	0-60 mm w.c.	Blue oil, 1.91 s.g.
Mark II 41-600PA	20-0-600 Pa	Blue oil, 1.91 s.g.

*Require Pitot tube at additional cost. ①

① Pitot tube: See pages 186-188 (Test & Data section)

Process Tubing Options: See page 455 (Gage Tubing Accessories)