



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN INDICADOR DE VENTILACIÓN DE PÉNDULO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Mecánico

PRESENTA:

Carlos Alberto Fernández Bernal

DIRECTOR DE TESIS :

Dr. Rafael Chávez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México. Noviembre, 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**

(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO Y DESARROLLO DE UN INDICADOR DE VENTILACION DE PENDULO que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

CARLOS ALBERTO FERNANDEZ BERNAL

Número de cuenta: 316671846

Agradecimientos

Expreso mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y brindado su apoyo a lo largo de mi formación académica y profesional, especialmente durante la elaboración de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por haberme proporcionado los conocimientos, valores y herramientas que han sido esenciales en mi educación y en mi crecimiento personal.

Al Dr. Rafael Chávez Martínez, mi asesor, por su orientación, confianza y apoyo constante en cada etapa del desarrollo de este trabajo.

A mi amigo y compañero, Fernando Jaír Calderón Peña, por haber construido junto conmigo una parte fundamental de este proyecto.

A la Dirección de Transferencia Tecnológica de la Coordinación de Vinculación y Transferencia Tecnológica por su sobresaliente asesoría con respecto a los registros de propiedad industrial e intelectual, y a la Dirección General de Orientación y Atención Educativa por otorgarme la “Beca para titulación egresados de alto rendimiento 2024-2025”, entre otros programas de apoyo.

A mis profesores, amigos y compañeros, por todo lo aprendido y por los buenos momentos que hicieron de mi formación como Ingeniero Mecánico una experiencia invaluable.

A mi madre, Beatriz Eugenia Bernal Guerrero, y a toda mi familia, por su amor incondicional, su comprensión y su apoyo incansable durante todos estos años de esfuerzo y dedicación.

Muchas gracias.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Panorama actual	9
1.2. Enfoque de la tesis	11
1.3. Antecedentes	13
1.3.1. Ventilación	13
1.3.2. Medición y estimación de la velocidad del viento	14
1.3.3. DIY (Do It Yourself) y hardware libre	20
1.4. Objetivo de la tesis	22
1.5. Objetivos particulares de la tesis	22
2. Desarrollo del instrumento	23
2.1. Sistema físico y su modelado físico-matemático	23
2.2. Experimentación	28
2.2.1. Dispositivo experimental y selección de materiales	28
2.2.2. Pruebas de verificación del modelo	30
2.2.3. Efectos de la temperatura ambiente y presión atmosférica	35
2.2.4. Confiabilidad	36
2.2.5. Factor de corrección	39
2.3. Análisis de Resultados	39
3. Cálculos de ventilación	42
3.1. Grado de ventilación	42
3.1.1. Grado de ventilación mínimo necesario	43
3.1.2. Grado de ventilación real	43
3.2. Ventilación adecuada de un recinto	45
3.3. Desplazamiento proyectado	46
3.4. Diana de ventilación	47
4. Producto	48
4.1. Diseño final y componentes	48
4.2. Recomendaciones de uso	51
4.3. Aplicación (Software)	51
4.4. Caso de estudio y uso de la aplicación	53
5. Conclusiones y trabajo a futuro	56
5.1. Conclusiones	56
5.2. Trabajo a futuro	57
Bibliografía	59
A. Especificaciones de las pruebas experimentales	66
B. Registros de propiedad industrial e intelectual	67
B.1. Modelo de utilidad	67
B.2. Aplicación (Software)	67

Símbolos, siglas y abreviaciones

Símbolo	Definición	Unidades
ACH	Grado de ventilación de un recinto (cambios de aire por hora, o <i>air changes per hour</i> en inglés)	1/h
ACH _{mn}	Grado de ventilación mínimo necesario	1/h
ACH _r	Grado de ventilación real	1/h
A_l	Área libre	m ²
A_p	Área proyectada de la esfera	m ²
A_z	Área de piso del espacio	m ²
C_d	Coefficiente de descarga	
C_D	Coefficiente de arrastre	
dp	Desplazamiento proyectado	m
D_e	Diámetro de la esfera	m
E _{PP1}	Pelota de ping-pong 1	
E _{PP2}	Pelota de ping-pong 2 (certificada por la ITTF)	
E _{U1}	Esfera de unicel 1	
E _{U2}	Esfera de unicel 2	
$\mathbf{F}_c$	Vector de factores de corrección candidatos	
Fr_D	Número de Froude basado en el diámetro de una esfera	
g	Aceleración local de la gravedad	m/s ²
IAQ	Calidad del aire en interiores (<i>Indoor Air Quality</i> en inglés)	
ITTF	Federación Internacional de Tenis de Mesa (<i>International Table Tennis Federation</i> en inglés)	
k	Factor de corrección	
l	Longitud del filamento	m
$\mathbf{M}_{aj}$	Matriz de modelos ajustados	
m_e	Masa de la esfera	kg
P_{atm}	Presión atmosférica	kPa, mmHg
P_z	Número de personas dentro del espacio	
Q_{bz}	Gasto mínimo requerido de aire en la zona de respiración de un espacio	L/s
Q_{real}	Gasto real de aire en el recinto	m ³ /s
R_a	Gasto requerido por unidad de área	L/s m ²
R_p	Gasto requerido por número de personas	L/s persona
R_{aire}	Constante particular del aire seco	kJ/kg K
Rv	Radio de ventilación	cm

Símbolo	Definición	Unidades
Re_a	Número de Reynolds a través de una abertura	
Re_D	Número de Reynolds para un flujo alrededor de una esfera	
$Re_{D,cr}$	Número de Reynolds crítico para un flujo alrededor de una esfera	
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C, K
v	Velocidad del viento	m/s
v_{mva}	Velocidad mínima del viento para una ventilación adecuada	m/s
V_e	Volumen de la esfera	m ³
$V_{espacio}$	Volumen del espacio	m ³
μ_{aire}	Viscosidad dinámica del aire	Pa · s
ν_{aire}	Viscosidad cinemática del aire	m ² /s
ρ_{aire}	Densidad del aire	kg/m ³
ρ_e	Densidad de la esfera	kg/m ³
ρ_r	Relación de densidades (aire-esfera)	
θ	Desplazamiento angular	°
θ_{exp}	Desplazamiento angular experimental	°
θ_{teo}	Desplazamiento angular teórico	°
$\theta_{teo, corr}$	Desplazamiento angular teórico corregido	°
Θ_{exp}	Curva de ajuste de θ_{exp}	°

Glosario de definiciones

Término	Definición
Aire	Una mezcla de gases que forma la atmósfera terrestre compuesta por nitrógeno, oxígeno, argón y otros gases.
Aire exterior	Aire fresco. Aire del ambiente que entra a un recinto a través de una ventana o puerta gracias a un sistema de ventilación natural o artificial.
Aire interior	Aire que se encuentra dentro de un recinto.
Anemómetro	Instrumento utilizado para medir cuantitativamente la velocidad del viento.
Área libre	Se refiere al área de la abertura por donde el aire entra o sale de un recinto sin obstrucciones.
Grado de ventilación	Medida que indica cuántas veces se reemplaza todo el volumen de aire de una habitación por aire fresco cada hora.
Ventilación de confort	Ventilación con niveles de humedad relativa, temperatura y velocidad de aire adecuados para asegurar una sensación de confort de los trabajadores en caso de tener ventilación artificial.
Viento	Aire en movimiento.
Zona de respiración	Región definida dentro de un espacio ocupado entre planos de 0.075 m y 1.8 m sobre el piso y más de 0.6 m de las paredes o equipos fijos de aire acondicionado.

Resumen

Los humanos tendemos a pasar la mayor parte de nuestro tiempo en interiores, que es donde se tiene el mayor riesgo de contagio de enfermedades de transmisión aérea gracias a la expulsión de microorganismos patógenos durante el proceso natural de respiración. No obstante, una ventilación adecuada del espacio puede reducir significativamente la concentración de estos microorganismos en el aire, disminuyendo este riesgo.

Desafortunadamente, no existe una ventilación adecuada universal que se pueda establecer, ya que, de acuerdo con el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022, cada recinto tiene un grado de ventilación mínimo necesario; es decir, un número mínimo de cambios de aire por hora (ACH) que alcanzar en función de su uso, su superficie y la cantidad de personas dentro de este para contar con una ventilación adecuada.

Además, no existen equipos que indiquen si se tiene dicho valor de ACH en determinado espacio, y los equipos con los que se puede medir la velocidad del aire para poder calcular este parámetro de manera indirecta son poco accesibles debido a su elevado costo y complejidad. Es por esto que se desarrolló un dispositivo capaz de indicar si la ventilación de un recinto es adecuada a partir de los efectos de la velocidad del viento y de las características del recinto en cuestión, buscando que este fuera económicamente accesible y de fácil manufactura, uso e interpretación, es decir, que tenga un enfoque en la práctica DIY (*Do It Yourself*).

Tomando como base un péndulo simple, se buscó determinar la velocidad del viento a partir de los efectos en su desplazamiento angular. Se formuló un modelo físico-matemático del sistema seleccionado, se construyó un dispositivo experimental y se efectuaron pruebas considerando distintos materiales y diversas condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente. Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre el modelo y los datos experimentales. Adicionalmente, se desarrolló una metodología que permite determinar si la ventilación de un recinto es adecuada o no, a partir de las características del recinto en cuestión y utilizando el dispositivo construido.

En esta tesis se propone el *indicador de ventilación de péndulo* como un producto enfocado en la práctica DIY, así como una aplicación que permite adaptar el dispositivo a recintos con distintas características de manera sencilla. Al final se mencionan algunas sugerencias para expansiones del tema.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se introduce la motivación detrás del desarrollo del *indicador de ventilación de péndulo* y el porqué de su importancia para la sociedad en la actualidad. Asimismo, se presentan los antecedentes históricos relevantes, algunos dispositivos y conceptos relacionados, y los objetivos de este trabajo escrito.

1.1. Panorama actual

Durante el proceso de respiración, expulsamos pequeñas gotas de saliva, dióxido de carbono y otras sustancias al ambiente. Si tenemos una infección viral, bacteriana o hasta parasitaria en las vías respiratorias, al exhalar, hablar, toser o estornudar, corremos el riesgo de infectar a los demás con estos microorganismos patógenos [1, 2, 3]. En interiores o espacios cerrados como edificios, hogares, oficinas, talleres, escuelas, auditorios, salas de usos múltiples y hasta vehículos, es donde las personas pasan más del 80 % de su tiempo y es donde existe una mayor concentración de estos gérmenes, por lo que es donde existe una mayor probabilidad de contagio. La concentración en el aire de estos microorganismos, partículas de polvo y otras sustancias consideradas como contaminantes, depende principalmente de la ventilación de estos recintos [4].

La ventilación se define como la renovación periódica del aire en interiores con aire fresco del exterior. Una buena ventilación, junto con un buen filtrado del aire, disminuye la concentración de los microorganismos y contaminantes en interiores, mejorando la calidad del aire y reduciendo el riesgo de propagación de enfermedades respiratorias [2, 5]. A su vez, una ventilación adecuada también reduce la contaminación de superficies como manijas de puertas, barandales, mesas o escritorios, al desplazar las partículas contaminantes antes de que puedan depositarse en estas superficies [3, 6].

Durante la emergencia sanitaria de 2020 a 2023 causada por la enfermedad COVID-19, se propusieron múltiples medidas para evitar los contagios; entre las que se encuentran: el uso de cubrebocas, el distanciamiento físico, la higiene de manos, la vacunación y, especialmente, una mayor ventilación en interiores. Esto fue así porque la forma más prevalente de contagio del coronavirus SARS-CoV-2 fue mediante la inhalación de partículas infecciosas en el aire, debido a que son capaces de permanecer suspendidas en el aire por periodos de tiempo prolongados [7, 8].

Debido a que la ventilación se asocia con la dilución de contaminantes en el aire, esta se ha propuesto como parámetro para evaluar el riesgo de exposición a patógenos causantes de enfermedades respiratorias [4]. No obstante, es relevante señalar que una ventilación adecuada, por sí sola, no garantiza una protección total frente a la COVID-19 y otras enfermedades de transmisión aérea, por lo que es recomendable revisar los programas de gestión para mejorar la calidad del aire elaborados por la SEMARNAT, llamados “ProAire” [9], así como las estrategias sanitarias emitidas por la Secretaría de Salud del Gobierno de México para evitar la propagación de estas enfermedades [10]. De igual forma, se recomienda revisar los protocolos de sanidad y artículos relevantes publicados por las instituciones académicas de renombre del país [11, 12]. Asimismo, se aconseja seguir las recomendaciones y medidas de prevención de contagio emitidas por instituciones

y agencias de salud como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) [6] o los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés), ambas de Estados Unidos [7].

En nuestro país existen Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulan la ventilación y la calidad del aire en distintos casos. Las normas NOM-020-SSA1-2021 hasta la NOM-026-SSA1-2021 establecen los límites máximos permisibles para la concentración de ciertos gases y partículas suspendidas en el aire como medida de protección a la salud de la población [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Mientras que en las normas NOM-034-SEMARNAT-1993 hasta la NOM-038-SEMARNAT-1994, y en la NOM-156-SEMARNAT-2012, se establecen los métodos y procedimientos de medición y monitoreo de la concentración de contaminantes atmosféricos [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Las NOM más relevantes para la ventilación en interiores son la NOM-001-STPS-2008, la NOM-016-STPS-1993, la NOM-016-SSA3-2012 y la NOM-033-STPS-2015 [26, 27, 28, 29]. La primera de estas presenta brevemente las condiciones de seguridad en el funcionamiento de los sistemas de ventilación artificial, así como una guía de referencia que presenta las condiciones en las cuales se da una **ventilación de confort**. En la segunda norma se establece que, para prevenir el daño en la salud de los trabajadores, la disponibilidad de oxígeno para la respiración debe ser en todo momento entre 18 % y 21 % en volumen, considerando una presión ambiental entre 522 mmHg y 860 mmHg. La tercera norma indica que la ventilación en hospitales y consultorios de atención médica especializada debe ser artificial y que el sistema encargado de esta deberá tener capacidad para llevar a cabo de 20 a 25 cambios de volumen de aire filtrado por hora. La última de estas normas establece valores límite de exposición a gases peligrosos y procedimientos de ventilación mecánica y purga de aire para trabajadores en espacios confinados.

Existen normas de calidad del aire interior no oficiales, como la NMX-C-7730-ONNCCE-2018, la cual habla sobre el papel que juega la ventilación en el confort térmico, y proyectos como PROY-NMX-C-577-ONNCCE-2020, el cual aborda aspectos como la temperatura, humedad, calidad del aire y eficiencia energética en edificios. También existen los criterios de evaluación del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), los cuales establecen parámetros, valores, documentación y metodologías para evaluar la calidad ambiental interior esperada de una edificación en lo relacionado con la ventilación y la calidad del aire con el fin de procurar el confort y la salud de los ocupantes [30, 31, 32].

Por otro lado, existen organizaciones internacionales que se dedican a establecer normas, guías y estándares técnicos como la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) y, particularmente para la ventilación, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (**ASHRAE**, por sus siglas en inglés). La ASHRAE es una asociación profesional que posee más de 50,000 miembros en más de 130 países. Principalmente desarrolla y publica guías y manuales relacionados con el diseño y construcción de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, comúnmente llamados sistemas **HVAC** por sus siglas en inglés. Esta organización se ha convertido en una de las fuentes más confiables de normativas para la industria de aire acondicionado y ventilación [33].

La ASHRAE posee sus propios estándares referentes a la ventilación y la calidad del aire en interiores. El estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022: *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality* establece grados de ventilación mínimos y otras medidas que minimicen efectos adversos a la salud a través de una adecuada ventilación y una buena calidad de aire en interiores (**IAQ**, por sus siglas en inglés) [34]. Adicionalmente, el estándar ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2021: *Ventilation of Health Care Facilities* indica los requerimientos de diseño de los sistemas de ventilación en instalaciones de atención médica [35]. De entre todas las normas y estándares mencionados anteriormente, el estándar 62.1-2022 de la ASHRAE es el único que permite calcular la ventilación mínima adecuada de cualquier espacio en función de múltiples parámetros y valores de referencia.

Para establecer niveles adecuados de ventilación en interiores, es necesario contar con parámetros cuantificables y representativos de lo que se busca medir. En este caso, la ventilación de un

espacio se suele cuantificar a través de un parámetro llamado **grado de ventilación** de un recinto, el cual indica las renovaciones o cambios por hora del volumen de aire del espacio en cuestión por aire fresco. En inglés, este parámetro recibe el nombre *air changes per hour* (**ACH**, por sus siglas). El término grado de ventilación proviene del término en inglés *ventilation rate* y en algunas fuentes es llamado tasa de cambio de aire, del inglés *air change rate* [36].

Con respecto a la salud, es pertinente hablar de la IAQ debido a que, como se mencionó anteriormente, el humano promedio pasa cerca del 80% de su tiempo en interiores, donde la concentración de contaminantes, tanto de origen biológico como no biológico, es de 2 a 5 veces mayor que en exteriores. Por lo tanto, si no se tiene una ventilación adecuada, habrá una acumulación considerable de aerosoles y, como resultado, una mala calidad de aire. Los adultos mayores y los niños son los más propensos a sufrir por los efectos de una mala calidad de aire, como lo son la irritación de ojos, nariz y garganta, cansancio, mareos, dolores de cabeza, enfermedades respiratorias graves, entre otras [37].

De acuerdo con la ASHRAE, la IAQ se considera aceptable cuando el aire no contiene contaminantes en concentraciones nocivas, según lo determinen las autoridades competentes y con el que por lo menos el 80% de las personas expuestas no muestran insatisfacción. La concentración de contaminantes en el aire se clasifica con números desde el 1 hasta el 4; donde el aire clasificación 1 contiene baja concentración de contaminantes, mientras que el aire clasificación 4 contiene humos o gases en concentraciones lo suficientemente altas como para ser considerados nocivos [34]. Para más información sobre la IAQ en edificios, se recomienda consultar el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022 a profundidad, así como las normas internacionales ISO 17772-1:2017, ISO/TR 17772-2:2018 y la serie de estándares ISO 16000 [34, 38, 39, 40]. De igual manera, para recomendaciones sobre técnicas de limpieza y análisis del aire, es recomendable consultar la página web de las agencias e instituciones de salud de cada país o región.

Adicionalmente, el **desempeño de la ventilación** es otro parámetro que es de utilidad para evaluar la ventilación. El desempeño de la ventilación se compone por la eficiencia del intercambio de aire, la cual indica con qué eficiencia se distribuye el aire fresco en la habitación, y la efectividad de la ventilación, que muestra con qué eficiencia se eliminan los contaminantes del aire de la habitación. Para más información sobre el desempeño de la ventilación, se recomienda el libro *Building Ventilation—Theory and Measurement* [5]. Aunque existan múltiples parámetros importantes que nos permitan evaluar la ventilación de maneras diferentes, este escrito se enfocará en el grado de ventilación.

1.2. Enfoque de la tesis

Existen múltiples instrumentos que permiten evaluar la ventilación de un recinto de forma indirecta a partir de la medición de parámetros como la concentración de CO₂ en el aire, o el flujo de aire que pasa por un determinado espacio. Sin embargo, al momento de redactar este escrito, y en particular en México, no se ha encontrado instrumento comercial que indique si la ventilación de espacios de uso cotidiano es adecuada, o no. Esto es principalmente porque no existe una ventilación adecuada universal que alcanzar, sino que cada espacio tiene su propia ventilación requerida que depende de múltiples factores.

De acuerdo con el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022, para calcular el grado de ventilación de un espacio, es necesario conocer la velocidad del flujo de viento que entra o sale de este, así como algunas características del espacio en cuestión, como son sus dimensiones, el uso que se le da, la cantidad de personas dentro de él, además del área de las aberturas por donde pasa el aire, como lo son las ventanas. Con esta información y con valores de referencia es posible calcular el grado de ventilación de un recinto, y así determinar si su ventilación es adecuada. En este trabajo se utilizará como referencia la información emitida por la ASHRAE en el estándar mencionado anteriormente.

Como se señaló previamente, el grado de ventilación se refiere a las renovaciones de un volumen de aire por unidad de tiempo, por lo que, para determinar si la ventilación de un recinto es adecuada, primero se requiere conocer el gasto de aire que entra o sale del recinto. A su vez, para conocer el gasto de aire, es necesario conocer su velocidad.

La velocidad del viento puede variar considerablemente porque depende de factores naturales, como la geografía o el clima, y de factores no naturales, como los sistemas de ventilación artificial o la arquitectura del recinto, como la cantidad de ventanas y puertas abiertas, así como su ubicación. En 1998, Baldwin y Maynard hicieron mediciones de velocidad del viento dentro de 55 áreas de trabajo en 27 fábricas distintas. Estas contaban con ventilación natural, ventilación artificial o ninguna, y tenían distintas dimensiones y usos, pues eran oficinas, talleres, almacenes y laboratorios. Los resultados de estas mediciones reportan velocidades desde los 0.05 m/s a 1 m/s con una media de 0.3 m/s. Con estos resultados, es correcto concluir que la velocidad del viento en interiores es generalmente baja y que la velocidad mínima por registrar es de 0.05 m/s [41]. Por otro lado, el sitio web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico del Gobierno de la Ciudad de México permite generar gráficos de dirección y velocidad de viento, llamados rosas de viento, a partir de los datos recopilados en sus estaciones de monitoreo para periodos de tiempo determinados. Con el objetivo de establecer el rango típico de velocidad del viento que se presenta en la Ciudad de México, y particularmente en Ciudad Universitaria, se generó una rosa de viento para la estación Pedregal¹ para el año 2024. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 1.1 y en la Tabla 1.1 e indican que, independientemente de la dirección, el 99 % de las corrientes de aire presentaron una velocidad menor que 4.3 m/s y que un 78.3 % de estas se encontró entre 0 m/s y 2.1 m/s. Estos resultados nos permiten establecer un rango de velocidad del viento típico de **0.05 m/s a 4.3 m/s** [42].

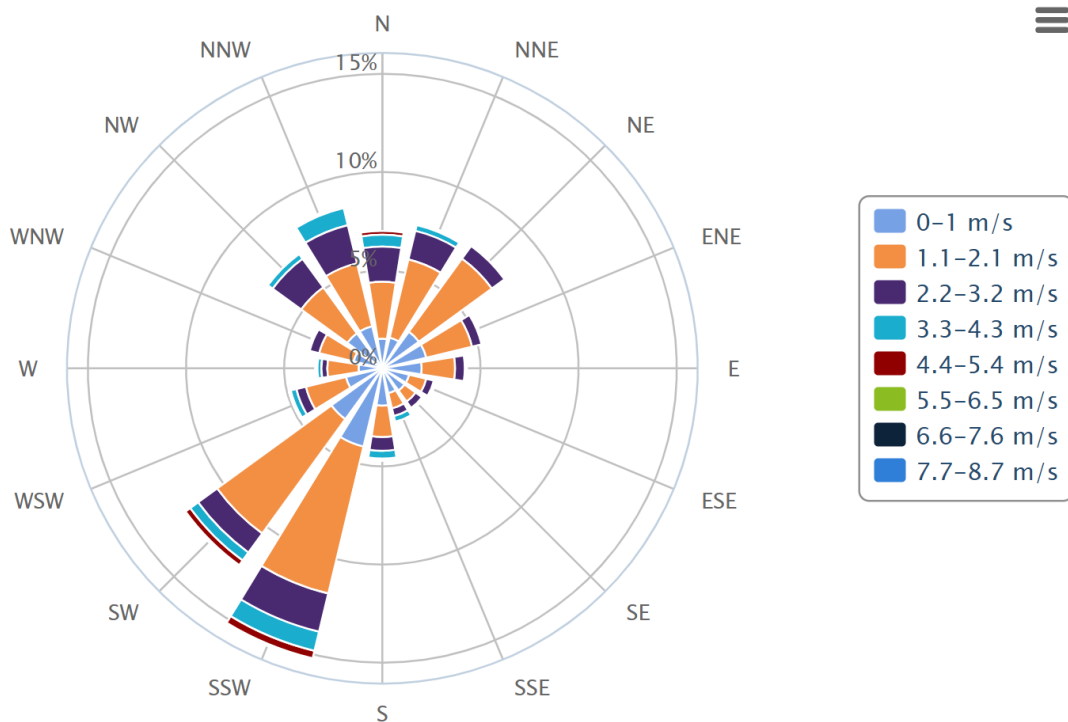


Figura 1.1: Rosa de vientos para todo el año 2024 (Estación Pedregal) [42].

Como resultado, se delimita el rango de velocidad del viento en interiores desde 0.05 m/s, como en una exhalación suave, hasta 4.3 m/s, con la cual banderas ondean de manera extendida y se mueven las hojas y ramas de los árboles constantemente. En la Escala de Beaufort, estas velocidades de viento corresponden a vientos de fuerza 0 y de fuerza 2, respectivamente [43].

¹La estación de monitoreo Pedregal (PED) en Ciudad de México es la más cercana a Ciudad Universitaria, que es donde se llevó a cabo todo lo desarrollado con esta tesis.

Tabla 1.1: Distribución porcentual de velocidad del viento por rangos en 2024 (Estación PED) [42].

	Velocidad del viento (m/s)							
	7.7 - 8.7	6.6 - 7.6	5.5 - 6.5	4.4 - 5.4	3.3 - 4.3	2.2 - 3.2	1.1 - 2.1	0.0 - 1.0
Total	0 %	0 %	0.2 %	1.4 %	5.3 %	15.3 %	46.3 %	32 %

Los instrumentos utilizados para medir la velocidad del viento son los **anemómetros**. Estos se utilizan comúnmente para aplicaciones meteorológicas, de aviación, oceanográficas, entre otras, y existe una amplia variedad de estos dispositivos con distintas características y principios de funcionamiento, lo cual los vuelve versátiles. No obstante, los anemómetros suelen tener dificultad para mostrar resultados confiables para bajas velocidades de viento debido a limitaciones relacionadas con sus componentes mecánicos o electrónicos. Adicional a esta desventaja, los anemómetros disponibles comercialmente suelen ser equipos costosos y complejos; algunos de ellos son sumamente sensibles y se necesita conocimiento y entrenamiento especializado para usarlos correctamente. Por lo tanto, estos instrumentos rara vez son utilizados por la población en general, y menos aún en zonas rurales aisladas o de bajos recursos. En la Sección 1.3.2 se hablará más a detalle sobre estos instrumentos.

Debido a estas desventajas, es importante hablar también sobre los **indicadores de viento**. Los indicadores son herramientas que proveen evidencia típicamente cualitativa del cumplimiento de una determinada condición o del logro de ciertos resultados al comparar dos o más datos. Los indicadores de viento, a diferencia de los anemómetros, indican la presencia, dirección o intensidad relativa del flujo de aire y no miden su velocidad de manera cuantitativa. Algunos indicadores de viento presentan escalas que permiten estimar la velocidad del viento dentro de determinados intervalos, mientras que otros se basan puramente en la interpretación del usuario; la dirección del viento se determina a partir de la observación. Estos dispositivos usualmente son mucho menos costosos, complejos y sensibles que los anemómetros; su principio de funcionamiento suele ser más sencillo y no cuentan con muchos componentes mecánicos o electrónicos. Estos dispositivos generalmente no requieren de conocimiento especializado ni entrenamiento para su uso.

Es por estas razones que el presente trabajo propone el desarrollo de un dispositivo indicador de ventilación con el cual sea posible determinar si la ventilación de un recinto es adecuada o no, basándose en la medición de la velocidad del viento principalmente en un intervalo entre 0.05 m/s y 4.3 m/s, así como en el cálculo del grado de ventilación asociado al recinto en cuestión siguiendo el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022. Con el objetivo de que este dispositivo sea accesible y pueda ser construido y utilizado por cualquier usuario sin que su posibilidad económica y ubicación geográfica sean un obstáculo, se busca que el dispositivo cuente con las siguientes características: a) de bajo costo, b) con pocos componentes, c) sencillo de construir, y d) de fácil interpretación. Como resultado, con este dispositivo será posible determinar si la ventilación de cualquier recinto es adecuada de una manera sencilla y económica.

1.3. Antecedentes

En esta sección se presenta un breve vistazo a la historia de la ventilación como un aspecto importante en la salud, así como los instrumentos utilizados en la medición de la velocidad del viento y algunos conceptos relacionados con el desarrollo del *indicador de ventilación de péndulo*.

1.3.1. Ventilación

La ventilación en interiores, como método para mejorar la higiene, fue introducida por la fundadora de la enfermería moderna, Florence Nightingale. Nacida en 1820 y de nacionalidad británica, ella

fue una enfermera, estadista y escritora que aplicó sus conocimientos a la epidemiología y a la estadística sanitaria. En su estadía como enfermera en la Guerra de Crimea, de 1853 a 1856, Nightingale hipotetizó que una gran parte de las infecciones eran causadas por una pobre ventilación y drenaje ineficiente. Después de que esto fuera remediado por la Comisión Sanitaria Británica, la tasa de mortalidad entre los soldados disminuyó enormemente, comprobando su hipótesis [44]. Este conocimiento fue recopilado en su obra titulada *Notes on Nursing*, la cual fue publicada en 1859 y donde se indica que para asegurar una buena salud son necesarios 5 componentes: aire puro, agua pura, drenaje eficiente, limpieza y luz. Con respecto al primero de ellos, Nightingale revela que para cuidar la salud de un paciente es crucial mantener el aire en interiores igual de limpio que el aire en exteriores, lo cual se logra mediante la ventilación [45]. Desde entonces, la ventilación se ha vuelto cada vez más importante para procurar una buena salud respiratoria a partir de la dilución de contaminantes y microorganismos suspendidos en el aire.

La ventilación se da cuando ingresa aire exterior a interiores y subsecuentemente se extrae el aire interior, arrastrando los contaminantes a la atmósfera. Para establecer un flujo de aire adecuado es necesario contar con, por lo menos, una entrada y una salida de aire [46]. La ventilación de interiores se puede dar de manera natural, mecánica o híbrida. La primera se refiere al flujo de aire a través de aberturas como puertas, ventanas, chimeneas, captadores de viento y respiraderos, causado por las corrientes de aire en la atmósfera o la diferencia de densidades del aire causada por un gradiente de temperatura o presión. Este tipo de ventilación depende del clima, del diseño de la infraestructura y del comportamiento humano, como el abrir y cerrar de ventanas y puertas [47].

La ventilación mecánica se refiere al flujo de aire generado por ventiladores mecánicos, y puede ser de presión positiva o de presión negativa. La ventilación mecánica de presión positiva, también llamada de impulsión o admisión, se da cuando un ventilador introduce a un espacio aire del exterior. En cambio, la ventilación mecánica de presión negativa, o extracción, es cuando un ventilador succiona aire del interior de un espacio hacia el exterior. La ventilación mecánica híbrida implica una ventilación mecánica cuando la ventilación natural no es suficiente, aunque también puede referirse a los ventiladores de techo, también llamados turbinas de viento *whirlybird* o *whirligig*, los cuales no requieren energía eléctrica y permiten la salida del viento por el techo [47].

Si los sistemas de admisión o extracción de aire no están bien diseñados, contaminantes de fuentes exteriores pueden ingresar al edificio antes de diluirse. Las fuentes pueden ser escapes de vehículos y chimeneas o extractores de humo de otros edificios. Estos contaminantes pueden causar malos olores, impactar en la salud y propiciar una menor calidad del aire interior. Para más información sobre el diseño de admisión y extracción de aire en edificios, se recomienda el capítulo 46 del manual *2023 ASHRAE Handbook – HVAC Applications* [46]. Asimismo, para más información sobre estrategias de ventilación en interiores, se recomienda el libro *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design* [36].

1.3.2. Medición y estimación de la velocidad del viento

En esta sección se presentan diversos instrumentos utilizados tanto para medir la velocidad del viento como para estimar su intensidad.

Anemómetros

El dispositivo para medir la velocidad del viento por excelencia es el anemómetro. Existe una amplia variedad de estos, los cuales funcionan bajo distintos principios físicos. Esto implica que cada anemómetro posee distintas características como rango de medición, precisión de medición, costo, piezas y consumo de energía. A continuación, se presentan los anemómetros más comunes.

Anemómetro de tubo de Pitot El anemómetro de tubo de Pitot también recibe el nombre de anemómetro de presión dinámica y es ampliamente utilizado en la aviación. Este se conforma por un tubo de Pitot y un tubo piezométrico; donde la combinación de ambos tubos recibe el nombre de tubo de Prandtl. Este anemómetro permite medir la velocidad del viento a partir de la diferencia de presiones que mide el tubo de Prandtl. Una vez conocida la presión dinámica, es decir, la diferencia entre la presión total, también llamada presión de estancamiento, medida en la punta del tubo y la presión estática medida al costado del tubo, se calcula la velocidad del flujo al resolver la famosa ecuación de Bernoulli. *Extech Instruments* es un proveedor de instrumentos de medición que fabrica distintos tipos de anemómetros. El anemómetro de tubo de Pitot Extech HD350, mostrado en la Fig. 1.2 (sin el tubo de Prandtl), es un ejemplo de este tipo de instrumentos [48].



Figura 1.2: Anemómetro de tubo de Pitot EXTECH HD350 [49].

Anemómetro de paletas El anemómetro de paletas, hélice, veletas, molinete o de rueda alada es probablemente el anemómetro portátil más popular. Está conformado por una pequeña turbina que se coloca perpendicularmente a la dirección del viento. Las paletas, al ser empujadas por la corriente de aire, hacen girar el rotor de la turbina, y un tacómetro determina la velocidad del viento en función del número de revoluciones por minuto del rotor. Las paletas pueden ser de plástico o metal; y las hay de muchos tamaños y geometrías. Un ejemplo de este tipo de instrumento es el anemómetro Extech 407113, ver Fig. 1.3 [48].



Figura 1.3: Anemómetro de paletas Extech 407113 de uso rudo [50].

Anemómetro de hilo caliente Este es el instrumento comercial portátil más preciso para medir la velocidad del viento. La sonda de medición está conformada por un hilo hecho comúnmente de tungsteno, por el cual se hace pasar una corriente eléctrica. Esto causa que el hilo aumente su

temperatura y, cuando una corriente de aire incide sobre él, se enfría como resultado de la transferencia de calor. El tiempo que el hilo tarda en enfriarse permite determinar la velocidad del viento. Debido a su funcionamiento, a este dispositivo también se le suele llamar termo-anemómetro. El anemómetro Extech 407123 es un ejemplo de este tipo de instrumentos, ver Fig. 1.4(a) [48]. Por otro lado, el dispositivo ComfortSense Mini de DANTEC Dynamics es un termo-anemómetro con sondas intercambiables y diseñadas para distintos rangos de medición [51]. Este se muestra en la Fig. 1.4(b).



(a) Anemómetro de hilo caliente Extech 407123 [52]. (b) ComfortSense Mini de DANTEC Dynamics [51].

Figura 1.4: Anemómetros de hilo caliente.

Anemómetro de cazoletas El anemómetro de cazoletas, copas o tazas es un instrumento muy popular, y los hay tanto portátiles como fijos. Se les puede ver en edificios y estaciones meteorológicas. Estos anemómetros funcionan mediante el giro de un rotor de manera similar a una turbina radial, donde el viento incide en las cazoletas y acciona el rotor del mismo modo que el agua acciona un molino de agua. Típicamente, la velocidad del viento se determina mediante un voltaje relacionado con la velocidad de giro del rotor. Como ejemplo, se presenta el anemómetro de cazoletas PCE-ADL-11 de *PCE Instruments* en la Fig. 1.5.



Figura 1.5: Anemómetro de cazoletas PCE-ADL-11 [53].

En la Tabla 1.2 se muestra un resumen de las características de los anemómetros comerciales enunciados previamente. Se incluye el tipo de anemómetro, su marca y modelo, el rango de medición, el costo si se encuentra disponible públicamente y notas adicionales.

Tabla 1.2: Resumen de las características de algunos anemómetros en el mercado.

Tipo	Marca y modelo	Rango de medición	Costo [USD]	Notas
Tubo de Pitot	Extech HD350	1 m/s – 8 m/s	\$430	También mide gasto y temperatura.
Paletas	Extech 407113	0.5 m/s – 35 m/s	\$435	También mide temperatura.
Hilo caliente	Extech 407123	0.2 m/s – 20 m/s	\$475	También mide gasto y temperatura.
Hilo caliente	DANTEC Comfort-Sense Mini	0.5 m/s – 35 m/s 0.1 m/s – 30 m/s	-	Tiene sondas intercambiables. También mide temperatura.
Cazoletas	PCE ADL-11	1.2 m/s – 30 m/s	\$264	-

Otros dispositivos

A continuación, se presentan algunos dispositivos utilizados para medir la velocidad del flujo de aire de manera alternativa a los anemómetros mencionados previamente. Estos dispositivos pueden tener propósitos distintos a medir la velocidad del viento, como medir el gasto o indicar su dirección. Entre estos se encuentran los indicadores de viento, los cuales suelen presentar información cualitativa sobre la intensidad del viento, o bien, un intervalo aproximado de su velocidad a partir de escalas.

Balómetro El balómetro es un instrumento que se utiliza en sistemas HVAC para determinar el gasto de aire que sale de un ducto. Se conforma por una bolsa o capucha que envuelve la salida del ducto y un micromanómetro instalado en su base. Gracias a la bolsa, todo el aire que sale del ducto pasa a través del micromanómetro, con el cual es posible determinar la presión dinámica del flujo de aire y, subsecuentemente, su velocidad. El balómetro TSI Alnor EBT731, mostrado en la Fig. 1.6, tiene un diseño sencillo y ergonómico, pero su precio no está disponible públicamente [54].



Figura 1.6: Balómetro TSI Alnor EBT731[54].

Cataviento (*tell-tale* y cono de viento) El cataviento puede referirse a dos tipos de instrumentos. El primero es llamado *tell-tale* en inglés y se utiliza principalmente en ámbitos marítimos,

ver Fig. 1.7(a). Este tipo de cataviento es un pedazo de tela que se fija en un extremo a un mástil, cuerda o vela de un bote e indica la intensidad y dirección de la corriente de viento que incide en él mediante el movimiento que presenta [55].

El segundo tipo de cataviento es llamado cono de viento, también conocido como manga de viento, bandera de viento, o calcetín. Este instrumento se utiliza en aviación y es sumamente útil para poder inferir con una sola mirada la intensidad del viento. Este tiene forma de cono truncado y se fija del extremo de mayor diámetro a un poste. El cono de viento está hecho de tela impermeable y generalmente se encuentra seccionado por franjas rojas y blancas. Al fluir el viento a través del cono, este modifica su forma. La posición de los distintos segmentos del cono es una escala que determina el intervalo de velocidad del viento; esto es, mientras más horizontal se encuentre el cono, mayor es la velocidad. El rango de medición evidentemente depende del tipo de cono de viento, pero en general se puede estimar hasta una velocidad de 12.9 m/s o 25 nudos cuando el cono se encuentra completamente horizontal [56]. Un ejemplo de este dispositivo se muestra en la Fig. 1.7(b).



(a) Cataviento *tell-tale* [55].

(b) Cono de viento [56].

Figura 1.7: Catavientos.

Veleta Una veleta es una placa que gira libremente sobre un eje o pivote y sirve para indicar la dirección del viento. Su funcionamiento se da gracias a su geometría y su homogénea distribución de masa en ambos lados del eje. De un lado se tiene un puntero con una superficie relativamente pequeña y del otro extremo se tiene una placa con una superficie mayor. Así, la veleta se orienta paralelamente con el viento; el puntero en el sentido del viento y la placa se orienta en el sentido opuesto [57]. La Fig. 1.8 muestra un ejemplo de este tipo de dispositivos.



Figura 1.8: Veleta [57].

Anemómetro de pelota de ping-pong El anemómetro de pelota de ping-pong es un instrumento didáctico cuyo principio de funcionamiento se basa en un péndulo que se puede construir

de manera artesanal y con recursos caseros. Este instrumento está basado en el anemómetro de Daloz, mostrado en la Fig. 1.9, el cual fue inventado a principios del siglo XX pero que ya se encuentra en desuso [58]. El anemómetro de pelota de ping-pong está conformado por una pelota de ping-pong colgando de un filamento, así como por un transportador cuyo origen se hace coincidir con el pivote del péndulo. [59, 60]. Este instrumento se muestra en la Fig. 1.10 y funciona para obtener el valor aproximado de la velocidad de una corriente de aire, la cual se calcula en función del desplazamiento angular del péndulo con respecto a la vertical. Sin embargo, debido a que se supone una gran cantidad de parámetros y no se tiene una calibración propia del instrumento, los resultados obtenidos generalmente son poco fiables. Como resultado, este dispositivo es muy diferente a los demás anemómetros presentados en esta tesis.

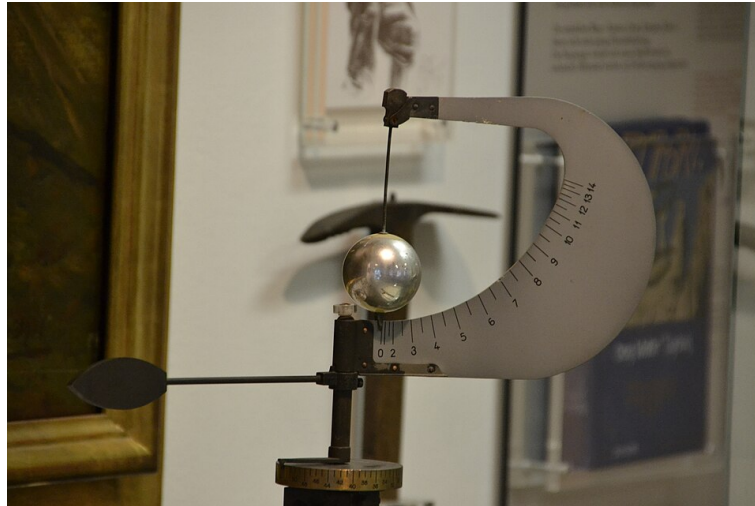


Figura 1.9: Anemómetro de Daloz [61].

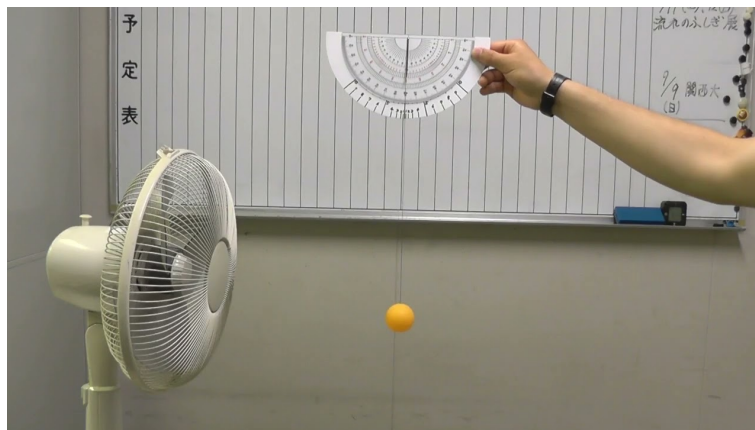


Figura 1.10: Anemómetro de pelota de ping-pong [60].

Aunque el sistema del anemómetro de pelota de ping-pong parezca precario y muy simple, también lo utiliza el dispositivo el indicador de viento de la estación meteorológica de la sonda espacial *Phoenix Mars Lander*, la cual fue lanzada por la NASA en 2008 y actualmente se encuentra en el planeta Marte [62]. Dado el ambiente al que está expuesto, se fabricó con materiales especiales como kevlar y kapton y con notables diferencias en su diseño. Este dispositivo fue nombrado como *Telltale* y se muestra en la Fig. 1.11.



Figura 1.11: *Telldale* (indicador de viento en la sonda espacial *Phoenix Mars Lander*) [62].

1.3.3. DIY (Do It Yourself) y hardware libre

Con relación a la propuesta de desarrollo de un dispositivo de costo accesible, sencillez de manufactura y fácil uso e interpretación, es útil introducir los términos **Hágalo Usted Mismo (HUM)**, o por su nombre en inglés ***Do It Yourself (DIY)***, y el **hardware libre**.

El término DIY se refiere a una práctica que consiste en fabricar y reparar objetos por uno mismo. Esto se realiza típicamente para ahorrar recursos monetarios, así como para aprovechar materiales reciclados. Se asocia con ser una opción sostenible y con tener una filosofía anticonsumista², ya que rechaza la idea de tener que comprar las cosas que uno desea o necesita. Esta práctica también posee otros beneficios, como el desarrollo de habilidades y destrezas. La práctica DIY es una alternativa que puede tomar cualquiera, pero a veces suele ser la mejor opción para personas e instituciones que se localizan en zonas aisladas donde es complicado recibir equipo especializado, o bien, que no tienen la posibilidad de invertir grandes cantidades monetarias en él o simplemente eligen no hacerlo [63].

El DIY ganó popularidad a mediados del siglo XX principalmente con la mecánica, la carpintería y la electrónica. En esta época existió una gran variedad de revistas dedicadas a publicar información sobre cómo reparar un electrodoméstico o un automóvil, o bien, cómo fabricar prendas de ropa, muebles, juguetes y hasta instrumentos musicales. Algunos ejemplos de estas son *Popular Mechanics*, *Mechanix Illustrated* y *Whole Earth Catalog*. En la Fig. 1.12 se muestra la portada de la revista *Electronics World* retratando un amplificador hecho en casa. Desde finales de la década de 1990, el DIY ha experimentado una explosión de popularidad en internet a través de miles de sitios [63]. Hoy en día, existen sitios web de DIY que enseñan desde cómo reparar una bicicleta, hasta cómo construir una casa.

El DIY en el ámbito tecnológico ha llevado al desarrollo del **hardware libre** o hardware de código abierto (llamado *open-source hardware* en inglés). El hardware libre se refiere a aquellos dispositivos cuyo diseño, especificaciones y diagramas esquemáticos son de acceso público, ya sea bajo algún tipo de pago o de forma gratuita. El hardware libre está intrínsecamente relacionado con la práctica DIY, ya que, al contar con el libre acceso al diseño de los dispositivos, solo hace falta conseguir los materiales y componentes necesarios para manufacturar, armar y hasta personalizar dicho dispositivo, lo cual es posible hacer por uno mismo.

Muchos ejemplos de hardware libre se asocian con equipo electrónico, desde pedales de efectos de sonido para guitarras eléctricas, hasta microscopios para laboratorios. El principal objetivo del hardware libre en un aspecto científico es facilitar la accesibilidad a equipo especializado disminuyendo hasta en un 90 % el costo original [64]. Un ejemplo es el microscopio óptico personalizable

²El anticonsumismo es una ideología sociopolítica que rechaza al consumismo, entendido como el consumo superfluo y desmedido de bienes y servicios.

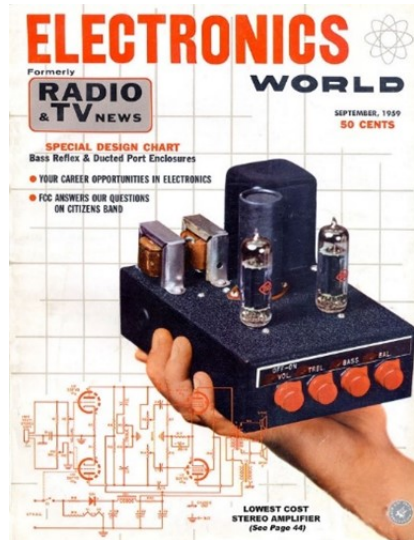


Figura 1.12: Portada de la revista *Electronics World* de 1959 [63].

OpenFlexure. Las especificaciones de este dispositivo son de acceso libre a través de internet y funciona con componentes de cámaras web u objetivos de microscopio de laboratorio. Se manufactura a través de la impresión 3D, se une con tornillos y tuercas, y utiliza componentes electrónicos comunes. También es modular, por lo que es posible modificar o intercambiar elementos en función de lo que se requiera [65].

Otro ejemplo de un equipo de hardware libre es la caja de Corsi-Rosenthal, mostrada en la Fig. 1.13. Este dispositivo es un purificador de aire DIY que se compone de un ventilador cuadrado, de uno a cuatro filtros de aire preferentemente fabricados siguiendo el estándar MERV13, así como una base y una cubierta de cartón. Su ensamblaje consiste en pegar los elementos entre sí con cinta adhesiva en la forma de un cubo, como lo indica el esquema de la Fig. 1.14. Este equipo se creó durante la pandemia de COVID-19 a partir de la necesidad de implementar estrategias de purificación del aire con tecnologías de bajo costo. La caja de Corsi-Rosenthal dura en funcionamiento entre 6 meses y un año debido a la vida útil de los filtros. Sin embargo, estos se pueden reemplazar para que la caja siga siendo utilizable. Se puede construir uno de estos dispositivos de manera sencilla en menos de 20 minutos y por un precio menor a \$120 USD [66, 67, 68].



Figura 1.13: Caja de Corsi-Rosenthal [67].

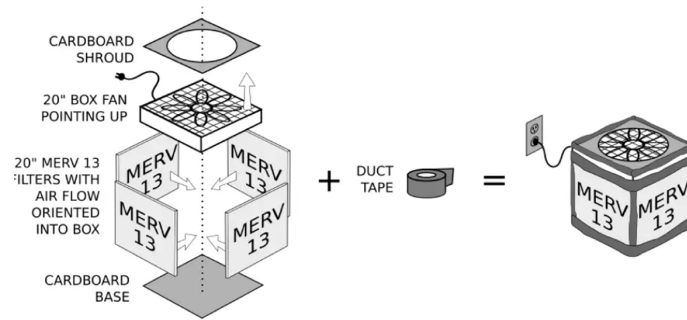


Figura 1.14: Esquema de una caja Corsi-Rosenthal. Este diseño en específico también es llamado “cubo Comparetto” [68].

1.4. Objetivo de la tesis

El objetivo de la tesis es desarrollar un dispositivo que indique si la ventilación en un espacio es adecuada o no, mediante los efectos de las corrientes de aire atmosférico que pasan por el recinto y el cálculo de su grado de ventilación de acuerdo con el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022. Es deseable que este instrumento siga la práctica DIY, en otras palabras, que sea accesible económicamente, que cuente con componentes sencillos de conseguir, así como que sea de fácil manufactura, uso e interpretación para todos los usuarios. Asimismo, se busca crear una aplicación que le dé adaptabilidad al instrumento y que, en conjunto con el diseño final, sea un producto de hardware libre, es decir, que sea de acceso libre a través de internet. Este dispositivo utiliza un péndulo como sistema físico, basándose en el anemómetro de pelota de ping-pong, por lo que recibe el nombre de *indicador de ventilación de péndulo*.

1.5. Objetivos particulares de la tesis

1. Seleccionar un sistema físico sencillo que permita determinar la velocidad de una corriente de viento a partir de un efecto físico medible.
2. Formular un modelo físico-matemático que describa el sistema seleccionado con precisión.
3. Fabricar un dispositivo experimental que permita efectuar pruebas experimentales de manera práctica y versátil.
4. Realizar pruebas para evaluar la concordancia entre el comportamiento teórico y experimental del instrumento, considerando distintos materiales y diversas condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica.
5. Desarrollar una metodología para determinar si la ventilación de un recinto cumple con los requerimientos establecidos por la ASHRAE.
6. Proponer el instrumento como un producto accesible enfocado en la práctica DIY, documentando su diseño, fabricación y uso.
7. Desarrollar una aplicación que permita adaptar el instrumento a recintos con diferentes características.

Capítulo 2

Desarrollo del instrumento

Este capítulo incluye la primera parte del desarrollo del *indicador de ventilación de péndulo*, la cual comienza por la introducción del sistema físico por utilizar y su respectivo modelado físico-matemático, tomando en cuenta algunas consideraciones para su aplicación. Luego, se presenta la etapa de experimentación, donde se presenta una serie de pruebas realizadas con el fin de comprobar el modelo obtenido y determinar los efectos que tienen distintos materiales y condiciones atmosféricas en el comportamiento del instrumento. Finalmente, se presentan los resultados de estas pruebas y su análisis correspondiente.

2.1. Sistema físico y su modelado físico-matemático

Los dispositivos utilizados para medir la velocidad del viento fueron mostrados en el Capítulo 1. Estos poseen características muy diferentes, desde los anemómetros más sofisticados hasta los indicadores de viento más simples, pero, como ya se ha mencionado, para el *indicador de ventilación de péndulo* es preferible la sencillez en componentes y funcionamiento. Por consiguiente, se seleccionará un péndulo como sistema, tomando como inspiración el anemómetro de pelota de ping-pong.

El péndulo es un sistema físico relativamente sencillo que comúnmente consiste en un cuerpo rígido que oscila libremente de un eje horizontal fijo que no pasa por su centro de masa [69, 70]. Esta es la definición de un **péndulo físico** o compuesto, cuyo diagrama de cuerpo libre se muestra en la Fig. 2.1(a), donde el eje ZZ' es el eje de rotación del péndulo, o bien, el eje horizontal fijo donde se encuentra el pivote (O), que es de donde cuelga el cuerpo. Sobre este último actúan dos fuerzas: su peso (mg), aplicado en su centro de masa (CM), y la fuerza normal (N) aplicada en el pivote.

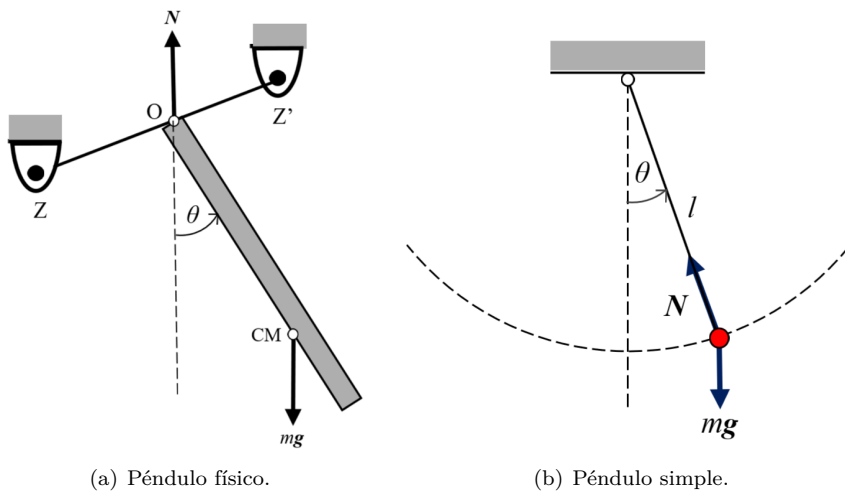


Figura 2.1: Diagramas de cuerpo libre de (a) un péndulo físico y de (b) un péndulo simple.

Para simplificar el análisis, se intercambiara el péndulo físico por el **péndulo simple**¹, el cual es un sistema físico idealizado constituido por una partícula de masa m suspendida de un punto fijo mediante un filamento que se considera inextensible y de masa despreciable [71]. Siendo la partícula suspendida el cuerpo de interés, las fuerzas que experimenta son su propio peso (mg) ejercido verticalmente hacia abajo y una fuerza normal (N) en forma de tensión en el filamento. Los parámetros del sistema son la masa de la partícula (m), la longitud del filamento (l) y el desplazamiento angular medido desde la vertical (θ). En la Fig. 2.1(b) se muestra el diagrama de cuerpo libre de un péndulo simple.

Para este caso en particular, el cuerpo suspendido como partícula se intercambiara por una esfera rígida, de superficie lisa y con una distribución de masa homogénea. Como consecuencia, se añade el diámetro de la esfera (D_e) como parámetro del sistema. Además, al incluir un flujo libre de aire con velocidad constante (v) en dirección horizontal, se genera una fuerza de arrastre sobre la esfera (f_D). El sistema modificado se presenta en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Fig. 2.2, en el que se presentan las fuerzas aplicadas a dicha esfera.

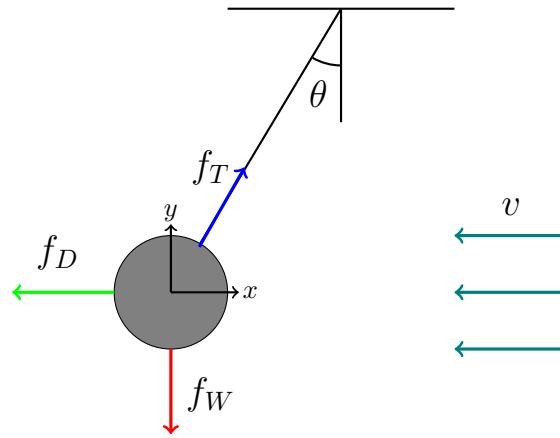


Figura 2.2: Diagrama de cuerpo libre del sistema por analizar.

La fuerza de arrastre (f_D) depende de las características tanto de la esfera como del flujo de aire, por lo que será la variable más importante al realizar el modelado físico-matemático del sistema. Por cuestiones prácticas para el análisis, el flujo de aire alrededor de la esfera se considerará unidireccional para no tomar en cuenta cualquier fuerza que pueda ser generada en otras direcciones. Estableciendo un sistema de referencia cartesiano bidimensional localizado en el centro de la esfera, el equilibrio estático de fuerzas se puede dividir en la suma de fuerzas tanto para el eje horizontal (f_x) como para el eje vertical (f_y). La primera se compone de la fuerza de arrastre (f_D) y la componente horizontal de la fuerza de tensión del filamento (f_T).

$$\begin{aligned}\sum f_x &= 0 \\ -f_D + f_T \sin \theta &= 0\end{aligned}\tag{2.1}$$

De la misma manera, la segunda es la suma del peso del cuerpo suspendido (f_W) y la componente vertical de la fuerza de tensión del filamento (f_T).

$$\begin{aligned}\sum f_y &= 0 \\ -f_W + f_T \cos \theta &= 0\end{aligned}\tag{2.2}$$

¹Aunque el *indicador de ventilación de péndulo* no está diseñado para oscilar libremente como un péndulo simple, recibe su nombre porque está constituido por los mismos elementos fundamentales que componen a un péndulo.

Despejando la fuerza de tensión de la Ecuación 2.2 se obtiene la Ecuación 2.3.

$$f_T = \frac{f_W}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

Al sustituir la Ecuación 2.3 en la Ecuación 2.1, resulta lo siguiente:

$$-f_D + \left(\frac{f_W}{\cos \theta} \right) \sin \theta = 0, \quad (2.4)$$

donde

$$f_W = m_e g \quad (2.5)$$

y

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_{aire} A_p v^2. \quad (2.6)$$

Adicionalmente, se presentan tres ecuaciones que agilizarán el desarrollo algebraico más adelante:

$$\begin{aligned} m_e &= \rho_e V_e, \\ V_e &= \frac{\pi}{6} D_e^3, \\ A_p &= \frac{\pi}{4} D_e^2; \end{aligned}$$

donde m_e , ρ_e , V_e son la masa, la densidad y el volumen de la esfera respectivamente, g es la aceleración local de la gravedad, C_D es el coeficiente de arrastre para la esfera, ρ_{aire} es la densidad del aire, A_p es el área proyectada de la esfera en la dirección del flujo, y v es la velocidad de la corriente de aire.

Al sustituir la Ecuación 2.5 y la Ecuación 2.6 en la Ecuación 2.4 se obtiene la Ecuación 2.7:

$$-\frac{1}{2} C_D \rho_{aire} A_p v^2 + m_e g \tan \theta = 0, \quad (2.7)$$

donde al reordenar los términos y hacer algunas sustituciones, se obtiene la Ecuación 2.8:

$$\frac{1}{2} C_D \rho_{aire} \left(\frac{\pi}{4} D_e^2 \right) v^2 = \rho_e \left(\frac{\pi}{6} D_e^3 \right) g \tan \theta. \quad (2.8)$$

Al simplificar y reorganizar se obtiene la Ecuación 2.9:

$$C_D v^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho_e}{\rho_{aire}} D_e g \tan \theta, \quad (2.9)$$

donde el C_D no es un valor fijo, a pesar de que con frecuencia se le considere así. Su valor se determina a partir de correlaciones empíricas obtenidas del escrito titulado *Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres* [72], en el que se recopila un gran número de correlaciones entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds para un flujo alrededor de una esfera de superficie lisa y de diámetro D (Re_D), válidas para $Re_D > 2 \times 10^5$. Este corresponde al número de Reynolds crítico para un flujo alrededor de una esfera ($Re_{D,cr}$) [73, 74]. Algunas de las correlaciones recopiladas en este artículo se muestran en la Fig. 2.3.

Para seleccionar la correlación adecuada es necesario determinar si $Re_D < Re_{D,cr}$ para las condiciones de uso del instrumento, por lo que será necesario especificar el rango de velocidad de trabajo, así como el rango de diámetros potenciales de la esfera por utilizar. Con respecto al rango de velocidad, el objetivo principal del instrumento es medir bajas velocidades para poder calcular el grado de ventilación en interiores, por lo que el rango de velocidad del viento considerado será principalmente de 0.05 m/s hasta 4.3 m/s, como se explicó en el Capítulo 1. Por otro lado, en los objetivos de la tesis se estableció que los componentes del dispositivo deben ser de bajo costo. Debido a esto y al antecedente del anemómetro de pelota de ping-pong, se considerará utilizar

Table 4Indirect empirical correlations for the drag coefficient of spheres valid for $Re_t < 200,000$.

Year	Investigator	C_d vs Re relationship
1989	Haider-Levenspiel [30]	$C_d = \frac{24}{Re_t} (1 + 0.140 Re_t^{0.6529}) + \frac{0.4607}{1 + \frac{2683}{Re_t}}$ $C_d = \frac{24}{Re_t} (1 + 0.186 Re_t^{0.6529}) + \frac{0.4372}{1 + \frac{7185}{Re_t}}$
1991	White [31]	$C_d = \frac{24}{Re_t} + \frac{6}{1 + Re_t^{0.5}} + 0.4$
1991	Swamee-Ojha [32]	$C_d = 0.5[16((\frac{24}{Re_t})^{1.6} + (\frac{130}{Re_t})^{0.72})^{2.5} + ((\frac{40000}{Re_t})^2 + 1)^{-0.25}]^{0.25}$
1993	Ganser [15]	See Table 1 Ganser
1994	Chien [33]	$C_d = \frac{24}{Re_t} + 67.289 e^{-5.03\varphi} = \frac{24}{Re_t} + 0.44 \text{ with } \varphi = 1$
2008	Loth [34]	$C_d = \frac{24}{Re_t} + 0.40 \text{ "a modified Cheng fit"}$
2008	Almedeij [18]	asymptotic matching of segments
2008	Hölzer-Sommerfeld [35]	$C_d = \frac{24}{Re_t} + \frac{3}{Re_t^{0.5}} + 0.42$
2011	Kelbaliyev [36] $0.01 < Re_t < 800$	$C_d = \frac{24}{Re_t} (1 + Re_t^{2.667} / (5 + 6.5 Re_t^2))$
2013	Terfous et al. [37] $50 < Re_t < 7400$	See Table 1 Terfous
2015	Dioguardi-Mele [38] $0.03 < Re_t < 10,000$	Best fitting with Ganser
2015	Krueger et al. [39]	Best fitting with Chien
2016	Bagheri-Bonadonna [40]	$C_d = \frac{24}{Re_t} (1 + 0.125 Re_t^{2/3}) + \frac{0.46}{1 + \frac{5330}{Re_t}}$

Figura 2.3: Fragmento de la Tabla 4 del artículo *Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres* donde se enlistan algunas correlaciones empíricas entre C_D y Re_D [72].

pelotas de ping-pong o esferas similares, ya que son relativamente fáciles de conseguir y de precio accesible. El rango de diámetros potenciales considerado es de 0.02 m hasta 0.06 m, ya que el diámetro típico de una pelota de ping-pong es de 0.04 m.

Para determinar si los valores de Re_D bajo las condiciones establecidas son menores que $Re_{D,cr}$, se calculó Re_D para la velocidad máxima del viento considerada para el instrumento (4.3 m/s), tanto para una esfera de 0.02 m de diámetro como para una esfera de 0.06 m de diámetro. Asimismo, se consideró que el dispositivo se encuentra en la Ciudad de México a una temperatura ambiente de 22 °C (295.15 K) y una presión atmosférica de 78 kPa. Se utilizó la Ley de los Gases Ideales para calcular la densidad del aire: $PV = mRT$.

$$\rho_{aire} = \frac{m_{aire}}{V_{aire}} = \frac{P_{atm}}{R_{aire} \cdot T_{amb}}$$

$$\rho_{aire} = \frac{78 \text{ kPa}}{0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 295.15 \text{ K}}$$

$$\rho_{aire} = 0.92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

También se utilizó la Ley de Sutherland para calcular la viscosidad dinámica del aire [74].

$$\mu_{aire} = \mu_0 \left(\frac{T_{amb}}{T_0} \right)^{1.5} \left(\frac{T_0 + 110.4 \text{ K}}{T_{amb} + 110.4 \text{ K}} \right)$$

$$\mu_{aire} = (1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}) \left(\frac{295.15 \text{ K}}{273 \text{ K}} \right)^{1.5} \left(\frac{273 \text{ K} + 110.4 \text{ K}}{295.15 \text{ K} + 110.4 \text{ K}} \right)$$

$$\mu_{aire} = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Es posible relacionar ambas cantidades a través de la viscosidad cinemática del aire (ν_{aire}).

$$\nu_{aire} = \frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire}} = \frac{1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{0.92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1.98 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Para una velocidad máxima de 4.3 m/s y una esfera de 0.02 m de diámetro, Re_D es:

$$Re_{D,1} = \frac{v_{max} D_{e,1}}{\nu_{aire}} = \frac{4.3 \frac{m}{s} \cdot 0.02 m}{1.98 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 4343.43, \quad (2.10)$$

mientras que para una esfera de 0.06 m de diámetro, el valor de Re_D es:

$$Re_{D,2} = \frac{v_{max} D_{e,2}}{\nu_{aire}} = \frac{4.3 \frac{m}{s} \cdot 0.06 m}{1.98 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 13030.30. \quad (2.11)$$

Los resultados obtenidos indican que para una velocidad máxima de viento de 4.3 m/s alrededor de una esfera cuyo diámetro es de 0.02 m hasta 0.06 m, $Re_D < 2 \times 10^5$. Con esto es posible seleccionar adecuadamente una de las correlaciones para calcular el C_D alrededor de una esfera. Se seleccionó la correlación desarrollada por Frank M. White y publicada en 1991 [72, 75].

$$C_D (esfera) \approx \frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_D}} + 0.4 \quad 0 \leq Re_D \leq 2 \times 10^5 \quad (2.12)$$

Esta correlación es relativamente sencilla, está compuesta por pocos términos y posee una incertidumbre no mayor que 10 % hasta un valor de $Re \approx 2 \times 10^5$, de acuerdo con White [75]. En la Fig. 2.4 se aprecia de forma visual la comparación entre la curva descrita por la Ecuación 2.12, algunas otras ecuaciones y datos experimentales.

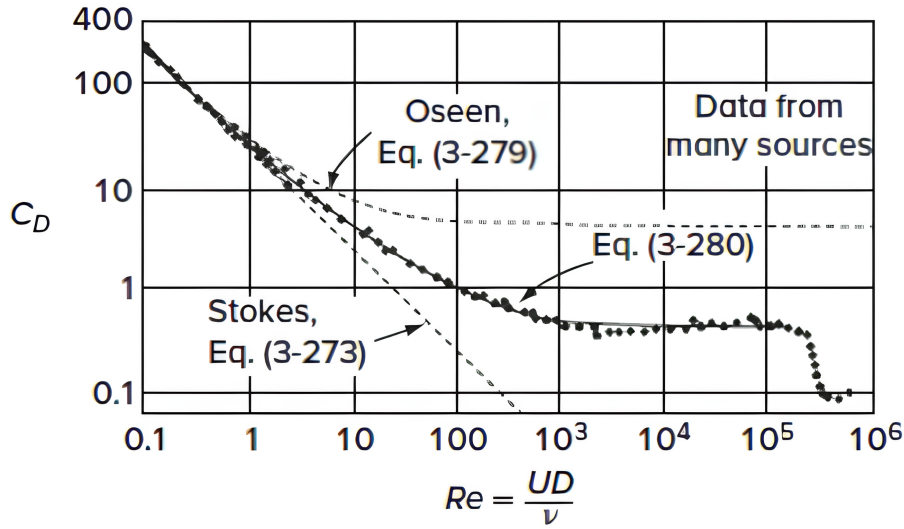


Figura 2.4: Comparación entre datos experimentales, ecuaciones teóricas (Stokes y Oseen) y la correlación empírica (White) para el coeficiente de arrastre alrededor de una esfera. La curva nombrada como “Eq.(3-280)” en la figura corresponde al comportamiento de la Ecuación 2.12 [75].

Reanudando el desarrollo del modelo físico-matemático, la Ecuación 2.12 se sustituye en la Ecuación 2.9, obteniéndose la Ecuación 2.13.

$$\left(\frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_D}} + 0.4 \right) v^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho_e}{\rho_{aire}} D_e g \tan \theta \quad (2.13)$$

Por último, al despejar la variable θ de la Ecuación 2.13 e introducir el número de Froude basado en el diámetro de la esfera (Fr_D), el cual compara la inercia de un flujo con los efectos de la gravedad, y la relación de densidades aire-esfera (ρ_r), se obtiene la Ecuación 2.14:

$$\theta = \arctan \left(\left(\frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_D}} + 0.4 \right) \frac{3}{4} \rho_r Fr_D^2 \right), \quad (2.14)$$

donde

$$Re_D = \frac{\rho_{aire} v D_e}{\mu_{aire}} = \frac{v D_e}{\nu_{aire}}, \quad (2.15)$$

$$Fr_D = \frac{v}{\sqrt{g D_e}}, \quad (2.16)$$

$$\rho_r = \frac{\rho_{aire}}{\rho_e}. \quad (2.17)$$

La Ecuación 2.14 ecuación describe el modelo físico-matemático para el péndulo y relaciona directamente al desplazamiento angular del péndulo (θ) con la velocidad del viento (v), la cual forma parte de las definiciones de los números adimensionales Re_D y Fr_D . No obstante, es necesario comprobar si esta ecuación analítica concuerda con el comportamiento experimental del péndulo, por lo que se realizarán múltiples pruebas en el siguiente subcapítulo.

2.2. Experimentación

La etapa de experimentación del *indicador de ventilación de péndulo* consiste en una serie de pruebas destinadas a caracterizar con precisión la relación entre el desplazamiento angular del péndulo y la velocidad del flujo de aire. El propósito de esta sección es, por un lado, comprobar la relación teórica propuesta en el modelo físico-matemático y, por otro, analizar el efecto de la variación de distintos parámetros sobre el comportamiento del sistema. En primer lugar, se describe el dispositivo experimental junto con los materiales empleados. Posteriormente, se presentan los resultados de las pruebas de verificación del modelo, en las que se utilizaron esferas de distintos tamaños y materiales con el fin de identificar la configuración más adecuada para el dispositivo. Luego, se desarrollaron pruebas destinadas a evaluar tanto el efecto de la temperatura ambiente como el de la presión atmosférica sobre el comportamiento del instrumento, así como su confiabilidad. Finalmente, se presenta el cálculo de un factor de corrección y el análisis de resultados.

2.2.1. Dispositivo experimental y selección de materiales

El dispositivo experimental se diseñó pensando en permitir un intercambio cómodo del filamento y de la esfera para poder realizar las pruebas rápidamente, así como para permitir su instalación en el túnel de viento del Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Este diseño consiste en una placa, dos barras de sujeción y un transportador, así como el filamento y la esfera; en la Fig. 2.5 se muestra el diseño en CAD. La placa actúa como soporte para todos los elementos, el transportador, cuya resolución es de 1° , se fija a la placa de manera paralela al flujo de aire, así como una de las barras de sujeción. Esta se fija en el centro de la placa y, junto con la otra barra de sujeción, sostiene el filamento.

Este diseño fue manufacturado completamente en acrílico y su construcción se muestra en la Fig. 2.6 y Fig. 2.7. En la primera se muestra el transportador después de ser manufacturado por corte láser y el proceso de pegado entre la placa, el transportador y una barra de sujeción. Mientras que en la segunda se muestra el ensamblado de la placa y las barras de sujeción con tornillos y tuercas.

De acuerdo con el modelo físico-matemático, se requiere un filamento delgado, inextensible y con poca masa, así como una esfera con superficie lisa y con una distribución homogénea de su masa. Además, es preferible que la esfera cuente con un área proyectada relativamente grande para maximizar la fuerza de arrastre y poca masa para reducir su inercia; es decir, que su densidad sea pequeña. Es importante recalcar que tanto el filamento como la esfera deben ser materiales fáciles de conseguir y a un precio accesible.

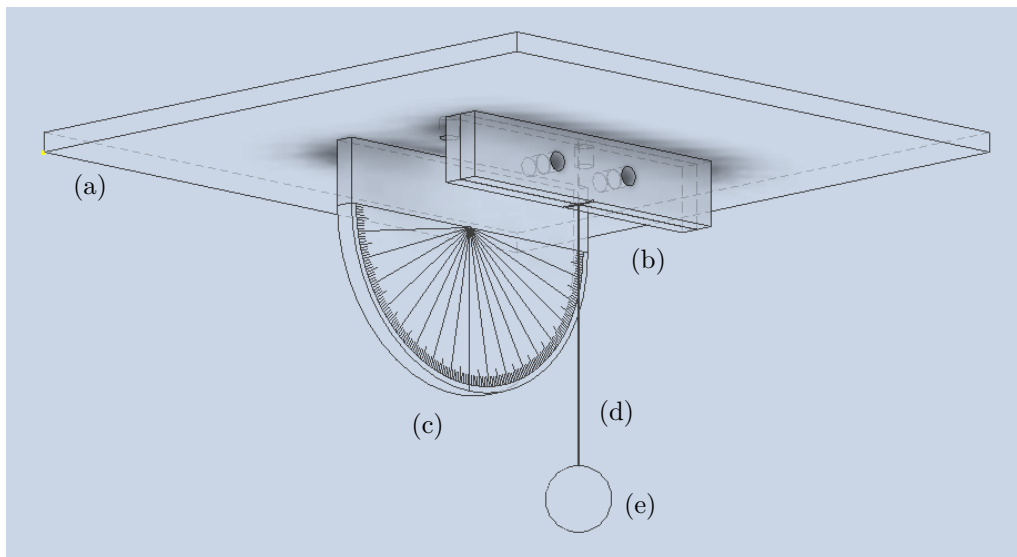


Figura 2.5: Diseño CAD del dispositivo experimental, donde: (a) placa, (b) barras de sujeción, (c) transportador, (d) filamento y (e) esfera.

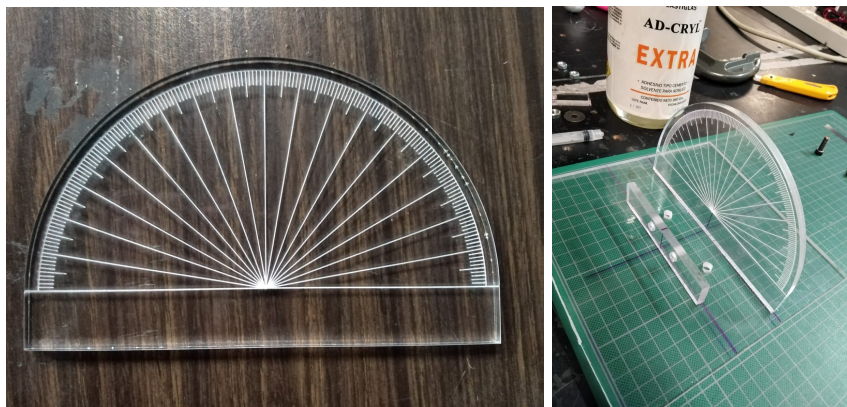


Figura 2.6: Transportador y pegado de la placa con el transportador y una barra de sujeción.



Figura 2.7: Ensamblado de la placa y barras de sujeción con tornillos y tuercas.

Como filamento fue seleccionado de hilo de nylon calibre 20, el cual es fácil de conseguir en mercaderías por un precio relativamente accesible. Mientras que para la esfera se optó por probar esferas de poliestireno expandido, coloquialmente conocido como unicel, y pelotas de ping-pong. A las primeras se les identificó como $E_{U\#}$, y a las segundas como $E_{PP\#}$; donde $\#$ es un número

otorgado a cada esfera. El diámetro de cada esfera se midió con un calibrador Vernier y la masa con una balanza granataria. Los materiales utilizados se muestran en la Fig. 2.8, y las características de las esferas se presentan en la Tabla 2.1.

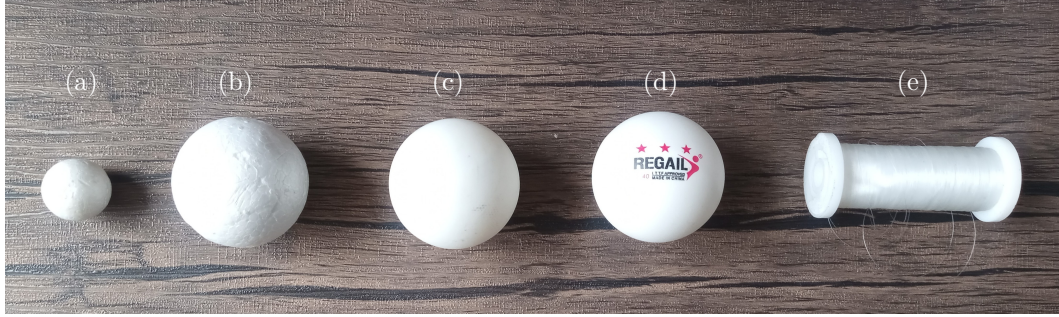


Figura 2.8: Materiales utilizados: (a) E_{U1} , (b) E_{U2} , (c) E_{PP1} , (d) E_{PP2} y (e) hilo de nylon.

En lo que respecta a las pelotas de ping-pong, estas se componen de una capa rígida de plástico ABS cuyo interior es hueco, mientras que las esferas de unicel son sólidas. Por cuestiones prácticas, se consideró una distribución de masa homogénea en todas las esferas y que el centro de masa de cada una coincide con su centro geométrico. Se lijó la superficie de las esferas de unicel para minimizar su rugosidad y acercarse a la condición de superficie lisa.

Tabla 2.1: Características de las esferas seleccionadas.

Esfera	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Masa (kg)	Densidad (kg/m ³)
E_{U1}	20.22×10^{-3}	0.43×10^{-5}	0.18×10^{-3}	41.86
E_{U2}	39.16×10^{-3}	3.14×10^{-5}	0.96×10^{-3}	30.57
E_{PP1}	39.78×10^{-3}	3.30×10^{-5}	1.89×10^{-3}	57.27
E_{PP2}	40.12×10^{-3}	3.38×10^{-5}	2.83×10^{-3}	83.73

Las esferas E_{U1} y E_{U2} fueron compradas en una tienda de papelería y las pelotas de ping-pong E_{PP1} y E_{PP2} fueron adquiridas por internet. Es importante mencionar que las pelotas de ping-pong en general pueden estar certificadas por la Federación Internacional de Tenis de Mesa (ITTF, por sus siglas en inglés) solo si poseen las medidas estándar establecidas por esta entidad, las cuales son 40×10^{-3} m de diámetro y una masa de 2.72×10^{-3} kg, entre otras características. Sin embargo, tanto la masa como el diámetro poseen un rango de tolerancia, por lo que se permite una variación de $\pm 0.5 \times 10^{-3}$ m para el diámetro y de $\pm 0.05 \times 10^{-3}$ kg para la masa [76].

Como se muestra en la Tabla 2.1, E_{PP1} no está certificada por la ITTF debido a que sus medidas se encuentran muy lejos de los rangos de tolerancia establecidos. En cambio, E_{PP2} sí se puede considerar como una pelota certificada a pesar de tener una masa ligeramente por encima del umbral mencionado previamente. También es importante notar que, aunque E_{U1} y E_{U2} están hechas de unicel, sus densidades son diferentes. Esto se debe a diferencias en su manufactura; sin embargo, ambas densidades se encuentran dentro del rango típico del unicel, el cual varía desde 10 kg/m³ hasta 45 kg/m³ [77].

2.2.2. Pruebas de verificación del modelo

Las pruebas de verificación del modelo consistieron en determinar la relación entre el desplazamiento angular del péndulo (θ) y la velocidad del flujo de aire (v) de manera experimental para corroborar la relación teórica establecida en el modelo físico-matemático. En esta prueba se utilizó

un tramo de 0.2 m de hilo de nylon como filamento y las esferas E_{U1} , E_{U2} , E_{PP1} y E_{PP2} . Los experimentos se realizaron en el túnel de viento del Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Dentro del túnel de viento se fijó el dispositivo experimental con tornillería, como se muestra en la Fig. 2.9, y se ajustó su posición con un nivel de burbuja para hacer coincidir el filamento del péndulo con la marca de 0° del transportador. Además, se adhirió una hoja de triplay pintada de color negro a un costado de la placa para tener un contraste visual entre el fondo y el filamento del péndulo, facilitando la toma de lecturas.

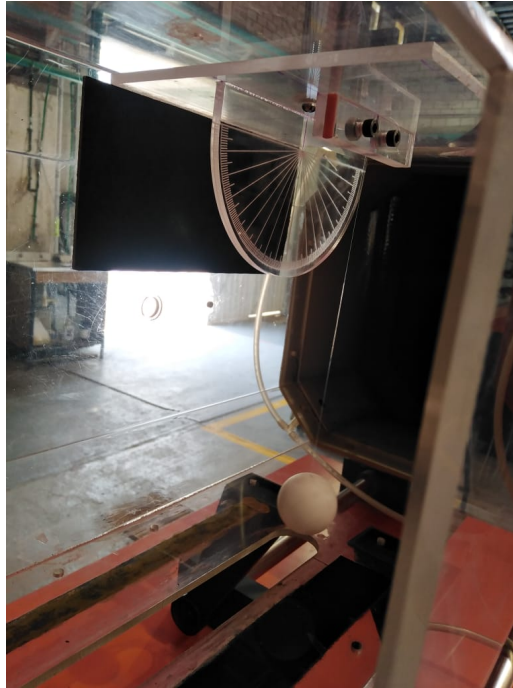


Figura 2.9: El dispositivo experimental montado en el túnel de viento.

El procedimiento de estas pruebas consistió en aumentar la frecuencia del motor del túnel de viento desde 0 Hz y medir el desplazamiento angular del péndulo (θ_{exp}) cuando el filamento empatara con un valor determinado en el transportador. Cuando ocurría esto, se medía la velocidad del viento (v) correspondiente utilizando un anemómetro de hilo caliente para las pruebas con las esferas E_{U1} , E_{U2} y E_{PP1} . Se utilizó un tubo de Prandtl conectado a un transductor de presión diferencial para la prueba con la esfera E_{PP2} . La presión atmosférica local y la temperatura ambiente se midieron con el barómetro y el termómetro instalados en el Laboratorio de Termofluidos. Algunos de los experimentos fueron realizados durante sesiones separadas, por lo que las condiciones atmosféricas son ligeramente diferentes, así como la cantidad tomada de mediciones. Los parámetros atmosféricos se muestran en la Tabla 2.2 y los detalles del arreglo e instrumentos utilizados se encuentran en el Apéndice A.

Cabe señalar que, aunque se definió el rango operativo de velocidad del viento para el instrumento entre 0.05 m/s y 4.3 m/s, se buscó maximizar la cantidad de datos recolectados para tener una mejor caracterización del comportamiento del dispositivo experimental. Este umbral de datos fue diferente para cada esfera porque se presentaron oscilaciones intensas que complicaron la toma de lecturas, por lo que se tomaron mediciones de θ hasta donde fue posible en cada caso. El valor máximo alcanzado de la velocidad del viento fue de 3.8 m/s ($\theta_{exp} = 44^\circ$) para la esfera E_{U1} , de 4.7 m/s ($\theta_{exp} = 40^\circ$) para E_{U2} , mientras que para E_{PP1} fue de 5.7 m/s ($\theta_{exp} = 30^\circ$) y para E_{PP2} fue de 6.5 m/s ($\theta_{exp} = 25^\circ$). Las oscilaciones pudieron haber sido causadas por irregularidades en las esferas como rugosidades, deformaciones en sus superficies o una distribución no homogénea de la masa, o bien, por la generación de vórtices debido a la separación de la capa límite.

Tabla 2.2: Parámetros atmosféricos durante las pruebas de verificación del modelo.

Parámetro	Valor
Temperatura ambiente (E_{U1} , E_{U2} , E_{PP1})	22 °C (295.15 K)
Temperatura ambiente (E_{PP2})	28 °C (301.15 K)
Presión atmosférica	78.26 kPa
Viscosidad dinámica del aire (E_{U1} , E_{U2} , E_{PP1})	1.82×10^{-5} Pa s
Viscosidad dinámica del aire (E_{PP2})	1.85×10^{-5} Pa s
Densidad del aire (E_{U1} , E_{U2} , E_{PP1})	0.92 kg/m ³
Densidad del aire (E_{PP2})	0.90 kg/m ³
R_{aire}	0.287 kJ/kg K
g	9.78 m/s ²

Se calculó el desplazamiento angular teórico (θ_{teo}) de manera analítica, es decir, sustituyendo las propiedades de cada esfera y los parámetros atmosféricos tomados durante las pruebas en la Ecuación 2.14. Los resultados para las pruebas de verificación del modelo se presentan en la Fig. 2.10, Fig. 2.11, Fig. 2.12 y Fig. 2.13, donde se muestra la relación de v con θ_{teo} y θ_{exp} para las esferas E_{U1} , E_{U2} , E_{PP1} y E_{PP2} , respectivamente. Las líneas continuas en color rojo corresponden al comportamiento teórico, mientras que los puntos en color azul corresponden a los valores discretos medidos experimentalmente. Además, se realizaron ajustes de datos para los valores de θ_{exp} para las cuatro esferas, llamados Θ_{exp} ; estos se muestran como líneas punteadas de color naranja.

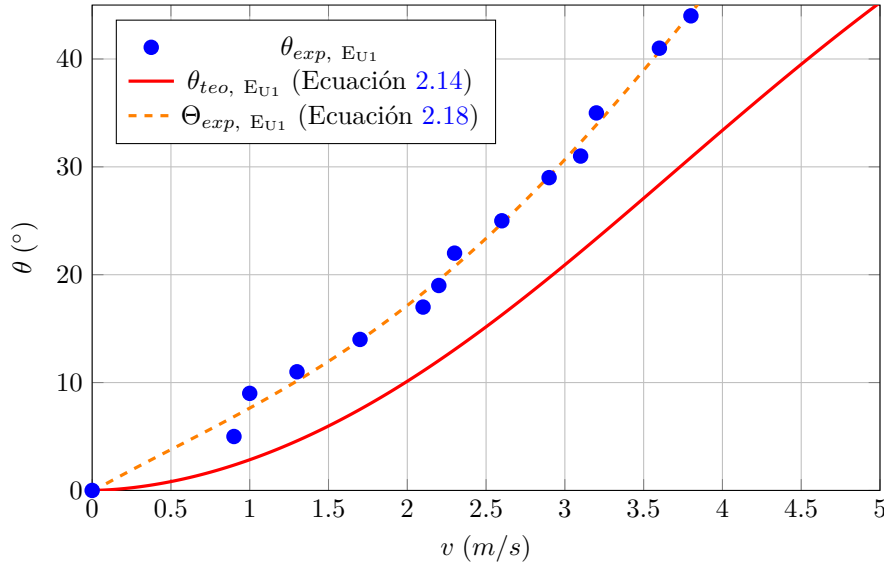


Figura 2.10: Desplazamiento angular teórico, experimental y el ajuste de datos experimental en función de la velocidad del viento para la esfera E_{U1} .

De la Fig. 2.10 a la Fig. 2.13 se puede observar que, para las cuatro esferas, $\theta_{exp} > \theta_{teo}$, y que a mayor velocidad, mayor es la diferencia existente entre ambos desplazamientos angulares. Se cree que el responsable de estas diferencias está relacionado con las imperfecciones en las esferas. Asimismo, pero en menor medida, también se cree que se debe a las simplificaciones hechas para poder estudiar el fenómeno, como utilizar las propiedades del aire seco o considerar uniforme la distribución de masa de las esferas, además de utilizar una correlación empírica para determinar el coeficiente de arrastre y considerar al flujo de aire como completamente horizontal, entre otros.

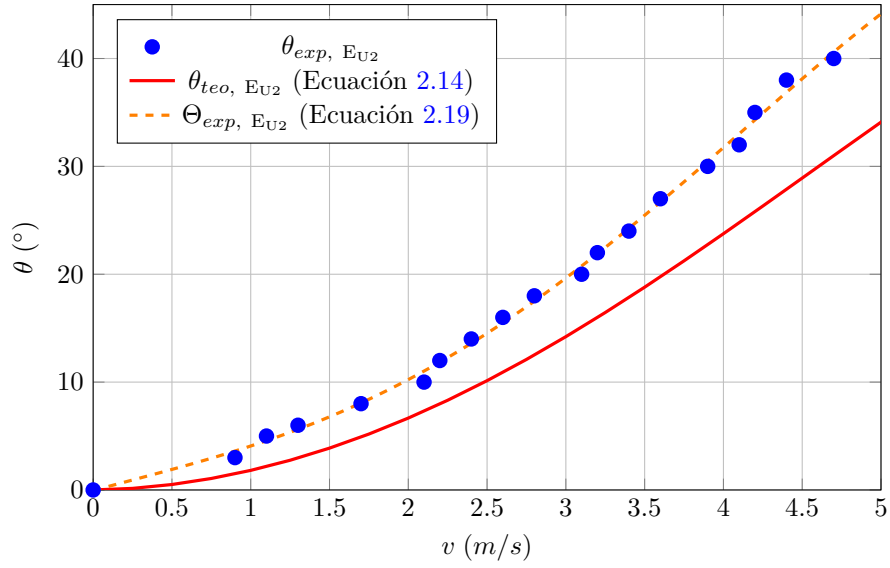


Figura 2.11: Desplazamiento angular teórico, experimental y el ajuste de datos experimental en función de la velocidad del viento para la esfera E_{U2} .

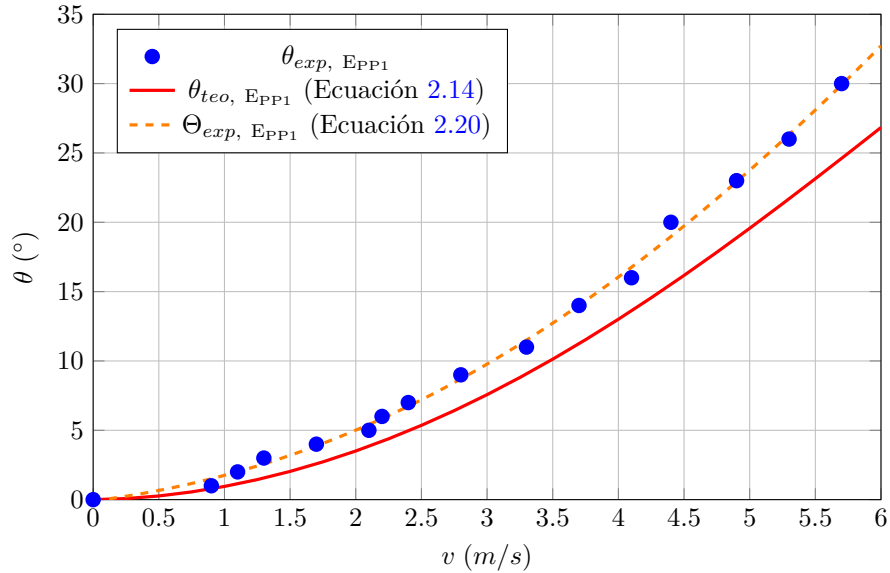


Figura 2.12: Desplazamiento angular teórico, experimental y el ajuste de datos experimental en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP1} .

Los ajustes se hicieron con el objetivo de compensar el número desigual de mediciones entre casos, así como para obtener representaciones continuas y comparables a partir de los valores discretos medidos, lo que permitió efectuar el análisis de manera más uniforme y sistemática. Para mayor claridad, tanto los valores de desplazamiento angular como las ecuaciones de las curvas de ajuste cuentan con el nombre de la esfera correspondiente como subíndice en la leyenda de cada gráfica. Debido a la tendencia no lineal de los datos experimentales, se utilizó el toolbox *CurveFitter* incluido en el software MATLAB para hacer los ajustes de datos. Se hicieron ajustes polinómicos de cuarto grado, obteniéndose las ecuaciones de Θ_{exp} para las cuatro esferas.

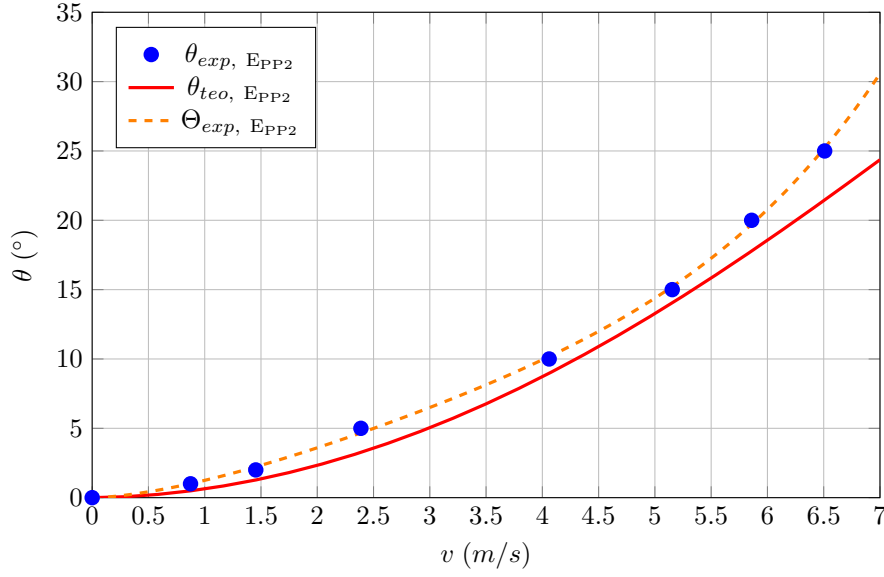


Figura 2.13: Desplazamiento angular teórico, experimental y el ajuste de datos experimental en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP2}.

- Esfera E_{U1}, para $0 \text{ m/s} \leq v \leq 3.8 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned}\Theta_{exp, E_{U1}} &= -0.1064v^4 + 1.0108v^3 - 1.3948v^2 + 8.2177v - 0.0923 \\ R^2 &= 0.99213\end{aligned}\quad (2.18)$$

- Esfera E_{U2}, para $0 \text{ m/s} \leq v \leq 4.7 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned}\Theta_{exp, E_{U2}} &= -0.0752v^4 + 0.6561v^3 - 0.4282v^2 + 3.9766v - 0.0532 \\ R^2 &= 0.99687\end{aligned}\quad (2.19)$$

- Esfera E_{PP1}, para $0 \text{ m/s} \leq v \leq 5.7 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned}\Theta_{exp, E_{PP1}} &= -0.0037v^4 + 0.0378v^3 + 0.6193v^2 + 1.1905v - 0.0914 \\ R^2 &= 0.9972\end{aligned}\quad (2.20)$$

- Esfera E_{PP2}, para $0 \text{ m/s} \leq v \leq 6.5 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned}\Theta_{exp, E_{PP2}} &= 0.0202v^4 - 0.2052v^3 + 1.0042v^2 + 0.4690v - 0.0390 \\ R^2 &= 0.99867\end{aligned}\quad (2.21)$$

Con el fin de determinar cuál es el mejor comportamiento de entre las cuatro esferas, mediante el software MATLAB se calculó el error RMS (del inglés *root-mean-square error*) en los cuatro casos. El error RMS es la raíz del error cuadrático medio entre N puntos de comparación entre θ_{teo} y el valor correspondiente de Θ_{exp} .

$$\text{Error RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\theta_{teo, i} - \Theta_{exp, i})^2}{N}} \quad (^\circ) \quad (2.22)$$

Para los cuatro casos, el error RMS se calculó en el rango de 0.05 m/s a 4.3 m/s, que corresponde a los límites de velocidad del viento establecidos para el funcionamiento del instrumento, y se

utilizaron 43 puntos de comparación, con incrementos de 0.1 m/s entre cada uno. Los errores RMS presentados en la Tabla 2.3 indican que la esfera con el comportamiento más apegado al teórico es E_{PP2} con un error RMS de 1.12° . El resto de las esferas tienen errores RMS mayores, por lo que quedan descartadas para su uso en el *indicador de ventilación de péndulo*.

Tabla 2.3: Errores RMS para distintas esferas durante las pruebas de verificación del modelo.

	Esfera			
	E_{U1}	E_{U2}	E_{PP1}	E_{PP2}
Error RMS ($^\circ$)	8.77	4.75	1.87	1.12

2.2.3. Efectos de la temperatura ambiente y presión atmosférica

Es importante determinar el efecto que tienen la temperatura ambiente (T_{amb}) y la presión atmosférica (P_{atm}) en el comportamiento del *indicador de ventilación de péndulo* para tener la posibilidad de utilizarlo en lugares distintos a la Ciudad de México y bajo condiciones atmosféricas variadas. Se calculó el desplazamiento angular teórico (θ_{teo}) para la esfera E_{PP2} a distintos valores de T_{amb} y P_{atm} y se compararon los resultados. Los valores seleccionados para T_{amb} fueron 5°C y 35°C para cubrir el espectro de temperatura media de todas las entidades federativas en el año 2024, así como una T_{amb} de referencia de 20°C por ser la temperatura media anual de la Ciudad de México en el año 2024, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional del Gobierno de México [78].

Por otro lado, los valores seleccionados de P_{atm} fueron 78 kPa y 101.325 kPa, los cuales corresponden a las presiones atmosféricas típicas de la Ciudad de México (~ 2240 msnm) y al nivel del mar (~ 0 msnm), respectivamente. Esto se debe a que, en primer lugar, la Ciudad de México es una de las grandes ciudades con mayor altitud en México, solo superada por la ciudad de Toluca y, al utilizar la presión atmosférica a nivel del mar como segundo punto de referencia, se incluyen la mayoría de las zonas urbanas del país.

Con respecto al análisis de la temperatura ambiente, en la Fig. 2.14 se muestran las curvas que describen los desplazamientos angulares teóricos de la esfera E_{PP2} a $T_{amb} = 5^\circ\text{C}$, 20°C y 35°C . Las líneas continuas corresponden a los desplazamientos angulares bajo una $P_{atm} = 78$ kPa y las líneas punteadas corresponden a 101.325 kPa.

La Fig. 2.14 indica que, para la misma v , mientras menor sea T_{amb} , mayor será θ . En cambio, mientras menor sea P_{atm} , θ será menor. Se calcularon los errores RMS entre las curvas obtenidas para θ , considerando a $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$ y $P_{atm} = 78$ kPa como referencia. Los resultados obtenidos analizando la T_{amb} se presentan en la Tabla 2.4, mientras que los resultados obtenidos analizando P_{atm} se presentan en la Tabla 2.5. Es importante notar que, al no contar con datos experimentales para este análisis, los errores se calcularon comparando datos teóricos exclusivamente, por lo que los errores obtenidos se consideran como errores de predicción.

Tabla 2.4: Errores RMS de predicción para θ_{teo} , E_{PP2} a distinta temperatura ambiente y a presión atmosférica constante.

Error RMS ($^\circ$)	$P_{atm} = 78$ kPa	$P_{atm} = 101.325$ kPa
$T_{amb} = 5^\circ\text{C}$	0.24	0.33
$T_{amb} = 35^\circ\text{C}$	0.24	0.23

La Tabla 2.4 evidencia que, para una diferencia en temperatura de 15°C por encima y por debajo de la temperatura media, el error RMS para θ es inferior a 0.33° en un rango de velocidad

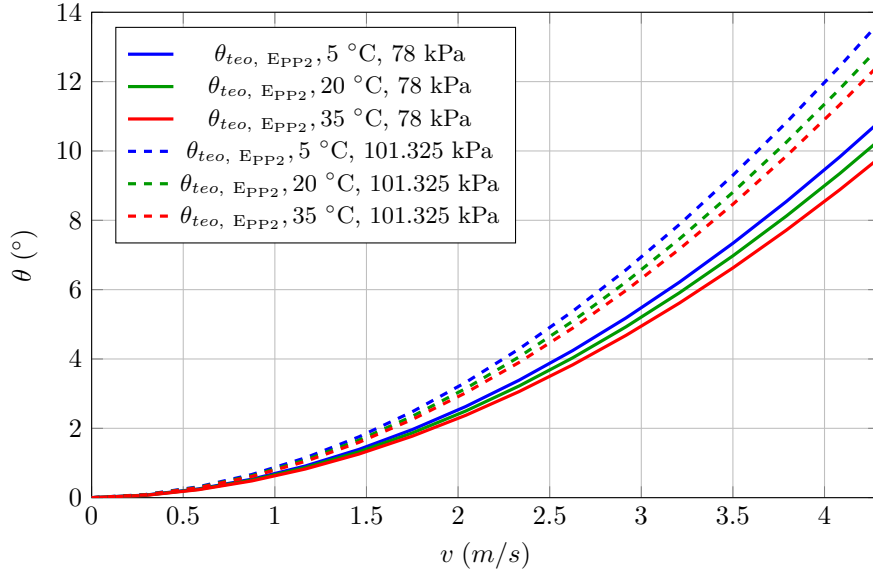


Figura 2.14: Comparación del desplazamiento angular teórico en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP2} a distintos valores de temperatura ambiente y presión atmosférica.

de 0.05 m/s a 4.3 m/s para ambos valores de P_{atm} . A partir de estos resultados, es posible concluir que los efectos que tiene T_{amb} en el comportamiento del *indicador de ventilación de péndulo* son mínimos.

Tabla 2.5: Errores RMS de predicción para $\theta_{teo, E_{PP1}}$ a distinta presión atmosférica y a temperatura ambiente constante.

Error RMS (°)	$T_{amb} = 5\text{ °C}$	$T_{amb} = 20\text{ °C}$	$T_{amb} = 35\text{ °C}$
$P_{atm} = 101.325\text{ kPa}$	1.32	1.23	1.23

Por otra parte, se aprecia una diferencia mucho más notable entre las curvas de θ a diferente P_{atm} . Los valores presentados en la Tabla 2.5 indican que, para una diferencia de aproximadamente 23 kPa, el error RMS supera 1.23° en un rango de velocidad de viento de 0.05 m/s a 4.3 m/s para los tres valores de T_{amb} analizados. Se concluye que el efecto que tiene P_{atm} en el comportamiento del *indicador de ventilación de péndulo* sí es considerable.

2.2.4. Confiabilidad

La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere a su capacidad para producir resultados consistentes y repetibles bajo las mismas condiciones pero en ocasiones diferentes. En el sentido más amplio, la confiabilidad indica el grado en que las diferencias individuales en las mediciones son atribuibles al error aleatorio de medición y en qué medida son atribuibles a diferencias reales en la variable que se está midiendo [79]. Para el *indicador de ventilación de péndulo* se realizó una prueba conocida como prueba-reprueba (o *test-retest* en inglés) para determinar la estabilidad temporal del instrumento. En esta se utilizó la esfera E_{PP2} y un tubo de Prandtl con un transductor de presión diferencial para medir la velocidad del viento, como se muestra en la Fig. 2.15. Los detalles del arreglo e instrumentos utilizados se encuentran en el Apéndice A.

El procedimiento para las pruebas de confiabilidad consistió en aumentar la frecuencia del túnel de viento desde 0 Hz y medir θ cuando el filamento empatara con un valor dado en el transportador. Simultáneamente, se medía la v correspondiente. En la Fig. 2.16 se muestra un ejemplo de la medición, en el cual se aprecia el hilo empatando con la línea correspondiente a

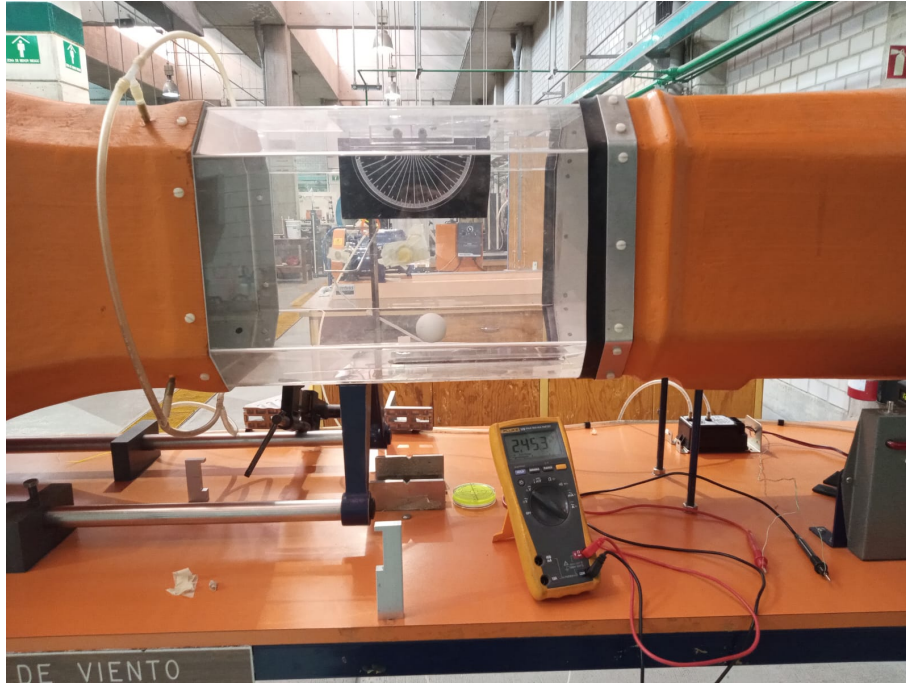


Figura 2.15: Arreglo utilizado durante las pruebas de confiabilidad.

$\theta = 5^\circ$ en el transportador. Cada vez que se llegaba a 15 Hz se apagaba el túnel de viento, se esperaba hasta que el péndulo dejara de oscilar y se repetía el procedimiento. Esto se hizo un total de 10 veces bajo condiciones controladas para determinar la variabilidad del instrumento en función del tiempo. Los parámetros atmosféricos durante la medición se presentan en la Tabla 2.6.

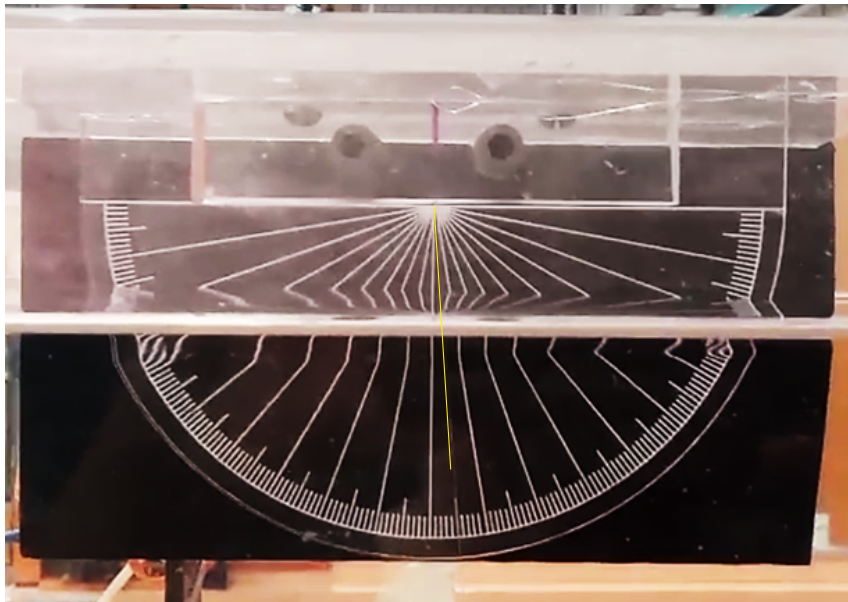


Figura 2.16: Lectura para $\theta = 5^\circ$ durante la prueba de confiabilidad resaltada en amarillo.

Después de recopilar los datos experimentales para las 10 repeticiones, se realizó un análisis estadístico donde se calculó la velocidad promedio para cada valor medido de θ y se obtuvo la desviación estándar (DE) y la desviación estándar relativa (DER) en cada caso. Adicionalmente, se determinaron las fluctuaciones de θ de manera visual durante las pruebas. Los resultados de este análisis se presentan en la Fig. 2.17

Tabla 2.6: Parámetros atmosféricos durante las pruebas de confiabilidad.

Parámetro	Valor
Temperatura ambiente	25 °C (298.15 K)
Presión atmosférica	78.26 kPa
Viscosidad dinámica del aire	1.83×10^{-5} Pa s
Densidad del aire	0.92 kg/m ³
R_{aire}	0.287 kJ/kg K
g	9.78 m/s ²

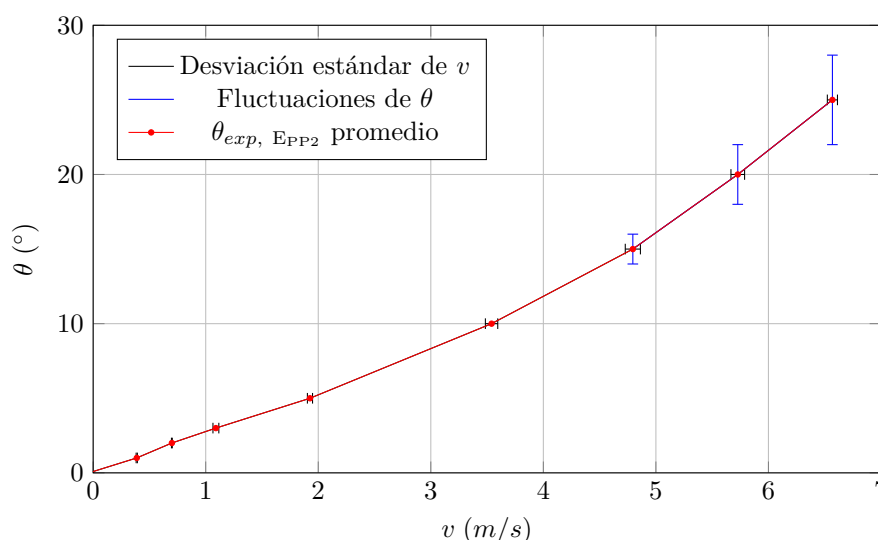


Figura 2.17: Desplazamiento angular experimental promedio en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP2} con barras de error representando a la desviación estándar en cada punto.

Como lo indica la Fig. 2.17 y la Tabla 2.7, la desviación estándar es mínima para velocidades menores que 3.54 m/s, y a una velocidad de 4.80 m/s esta alcanza su valor máximo con 0.07 m/s. La desviación estándar relativa es la máxima para una velocidad de 1.09 m/s, alcanzando un valor de 2.39%, por lo que se evidencia una alta estabilidad temporal del instrumento.

Tabla 2.7: Desviación estándar (DE) y desviación estándar relativa (DER) para E_{PP2} .

	Velocidad del viento (m/s)								
	0.00	0.39	0.70	1.09	1.93	3.54	4.80	5.73	6.57
DE (m/s)	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.06	0.07	0.06	0.05
DER (%)	0.00	1.47	0.54	2.39	1.20	1.55	1.41	1.06	0.69

Adicionalmente, las fluctuaciones de θ muestran que, para velocidades menores que 3.54 m/s, el péndulo prácticamente no oscila, por lo que produce una lectura precisa. Sin embargo, a partir de esta velocidad, el péndulo comienza a oscilar ligeramente y, en consecuencia, la lectura fluctúa y pierde precisión. Para una velocidad de 4.8 m/s, el desplazamiento angular correspondiente es de $15^\circ \pm 1^\circ$, mientras que para 5.7 m/s el desplazamiento angular es de $20^\circ \pm 2^\circ$, y para 6.6 m/s es de $25^\circ \pm 3^\circ$.

2.2.5. Factor de corrección

El modelo físico-matemático se construyó bajo algunos supuestos y simplificaciones que nos permiten describir de manera general el comportamiento del péndulo. Sin embargo, al comparar el comportamiento teórico con los datos experimentales, surgen discrepancias atribuibles a efectos no considerados en el modelo. Con el propósito de reducir estas diferencias y obtener una mejor representación del comportamiento real del sistema, se introduce un factor de corrección. Este parámetro ajusta la ecuación teórica de modo que los resultados analíticos se aproximen con mayor fidelidad a los valores experimentales y se reduzca el error RMS, alcanzando así una mayor confiabilidad en el modelo.

Para calcular el factor de corrección se utilizó el software MATLAB, donde se construyó la matriz de modelos ajustados ($\mathbf{M}_{aj}$) a partir del producto entre el vector de factores de corrección candidatos ($\mathbf{F}_c$) y el modelo físico-matemático para la esfera E_{PP2} ² ($\theta_{teo, E_{PP2}}$) evaluado en 43 puntos de comparación entre 0.05 m/s y 4.3 m/s. Los valores contenidos en el vector $\mathbf{F}_c$ se encuentran dentro del intervalo [1.00, 1.25] con incrementos de 0.01 entre cada uno. Este intervalo se estableció de forma empírica, ya que con valores más allá de los límites definidos, el ajuste comenzaba a desviarse significativamente del comportamiento buscado, incrementando el error RMS. La matriz de modelos ajustados se construye como lo establece la Ecuación 2.23:

$$\mathbf{M}_{aj} = \mathbf{F}_c \cdot \theta_{teo, E_{PP2}}, \quad (2.23)$$

donde

$$\mathbf{F}_c = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}, \quad k \in [1.00, 1.25], \quad \Delta k = 0.01. \quad (2.24)$$

Finalmente, se calculó el error RMS para cada valor dentro de la matriz $\mathbf{M}_{aj}$, tomando como referencia la curva de ajuste de datos experimental para E_{PP2} ($\theta_{exp, E_{PP2}}$). El valor con el cual se obtuvo el menor error RMS fue $k = 1.21$, donde este fue de 0.54° para el rango de velocidad 0.05 m/s a 4.3 m/s, mientras que el error RMS obtenido para el modelo físico-matemático original en ese mismo rango fue de 1.12° . Como resultado, el factor de corrección seleccionado es $k = 1.21$. En la Fig. 2.18 se presenta $\theta_{teo, E_{PP2}}$, $\theta_{exp, E_{PP2}}$, $\theta_{exp, E_{PP2}}$, y el modelo físico-matemático corregido para la esfera E_{PP2} , $\theta_{teo, corr, E_{PP2}}$. La ecuación del modelo físico-matemático corregido se presenta en la Ecuación 2.25:

$$\theta_{teo, corr} = 1.21 \cdot \arctan \left(\left(\frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_D}} + 0.4 \right) \frac{3}{4} \rho_r Fr_D^2 \right). \quad (2.25)$$

2.3. Análisis de Resultados

A partir de los resultados obtenidos en el subcapítulo de experimentación, es posible llegar a múltiples conclusiones de gran relevancia para el desarrollo del *indicador de ventilación de péndulo*. En cuanto a la selección de materiales para el dispositivo, el hilo de nylon representa una opción económicamente accesible y de amplia disponibilidad. Por otro lado, las pelotas de ping-pong certificadas por la ITTF, aunque es posible conseguirlas con relativa facilidad en supermercados, tiendas deportivas o por internet, presentan un costo superior en comparación con las no certificadas debido a su mayor calidad y estandarización en el proceso de fabricación. A pesar de esto, esta desventaja se compensa con la reducción en la variabilidad de las propiedades de las esferas seleccionadas, ya que las pelotas no certificadas pueden presentar tolerancias mucho más amplias. Adicionalmente, el uso de pelotas certificadas se traduce en un menor error, lo cual favorece la confiabilidad experimental del instrumento.

²Se consideraron los parámetros atmosféricos medidos durante las pruebas de verificación del modelo para la esfera E_{PP2} , los que se muestran en la Tabla 2.2 en la Sección 2.2.2

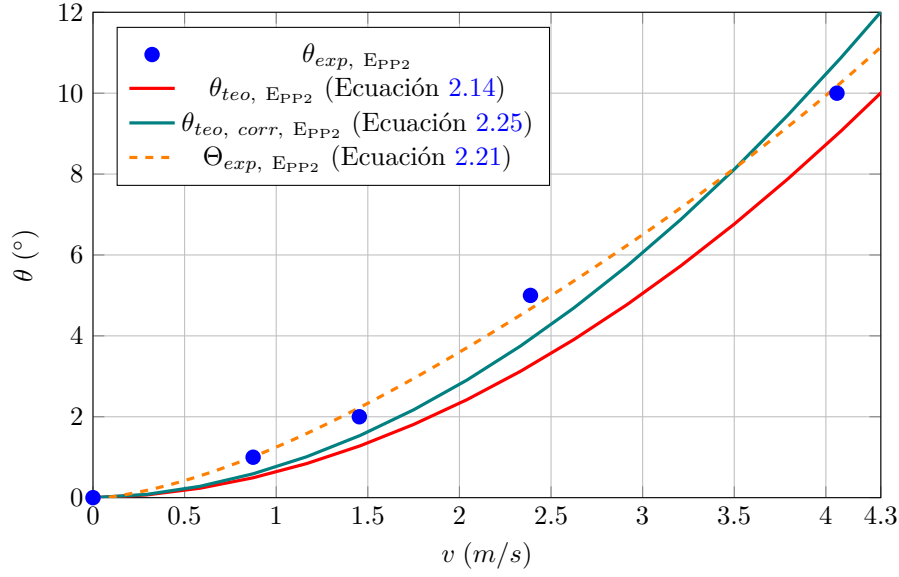


Figura 2.18: Desplazamiento angular teórico, teórico corregido (con $k = 1.21$), experimental y el ajuste de datos experimental en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP2} .

Los resultados de las pruebas de verificación del modelo sugieren que, para las esferas de 4 cm de diámetro, una esfera con muy baja densidad es muy sensible a las fluctuaciones del flujo de aire debido a su baja inercia, por lo que su oscilación es considerable y el error RMS incrementa. Sin embargo, la resolución con la que cuenta el instrumento con tal esfera es muy alta; por ejemplo, para la esfera E_{U1} , $\theta_{exp} = 20^\circ$ corresponde a una velocidad del viento de aproximadamente 2.2 m/s. Por otro lado, una esfera con mayor densidad es poco sensible a las fluctuaciones del flujo de aire ya que cuenta con una inercia mayor, por lo que oscila muy poco y el error RMS disminuye. Lamentablemente, la resolución en este caso es muy baja; por ejemplo, para la esfera E_{PP2} , $\theta_{exp} = 20^\circ$ corresponde a una velocidad del viento de aproximadamente 5.7 m/s. Como resultado, el comportamiento del instrumento es muy susceptible a las características de la esfera utilizada.

Previamente se estableció que el *indicador de ventilación de péndulo* pretende trabajar con velocidades de viento muy pequeñas; sin embargo, es preferible contar con un error RMS pequeño que contar con una muy alta resolución, por lo que la esfera seleccionada como la mejor opción es E_{PP2} . No obstante, se determinó un rango de densidades aceptables para esferas de 4 cm de diámetro que permite el uso de opciones alternativas en el instrumento. Si la densidad de la esfera utilizada es inferior a 72.30 kg/m^3 , o superior a 99.18 kg/m^3 , no se recomienda su uso porque los resultados obtenidos tendrán una incertidumbre superior a $\pm 1.5^\circ$ para una velocidad de viento de 4.3 m/s, o bien, un error RMS de aproximadamente 0.70° en el desplazamiento angular. En la Fig. 2.19 se muestran dos líneas punteadas: θ_{teo} ($\rho_e = 72.30 \text{ kg/m}^3$) y θ_{teo} ($\rho_e = 99.18 \text{ kg/m}^3$), además de la línea continua que describe a $\theta_{teo, E_{PP2}}$. Estas curvas punteadas indican el desplazamiento angular teórico para esferas con las densidades límite³.

Con relación al número de Froude (Fr_D), es posible predecir la respuesta del instrumento ante inestabilidades en el flujo de aire a partir del valor de este parámetro. Los resultados experimentales demuestran que si $Fr_D < 5$, los efectos de la gravedad dominan y la esfera tenderá a mantenerse estable y las fluctuaciones del flujo prácticamente no alterarán su movimiento. En cambio, si $Fr_D > 5$, la inercia del flujo domina y la esfera será más sensible a las fluctuaciones y su movimiento se verá fuertemente afectado.

Con respecto a los efectos de la temperatura ambiente y la presión atmosférica en el instrumento, la relación entre θ y v se ve afectada principalmente por P_{atm} a la cual se encuentre el dispositivo

³Las curvas obtenidas para las esferas con las densidades límite describen el comportamiento del instrumento con esferas con el mismo diámetro que E_{PP2} , pero con masa distinta.

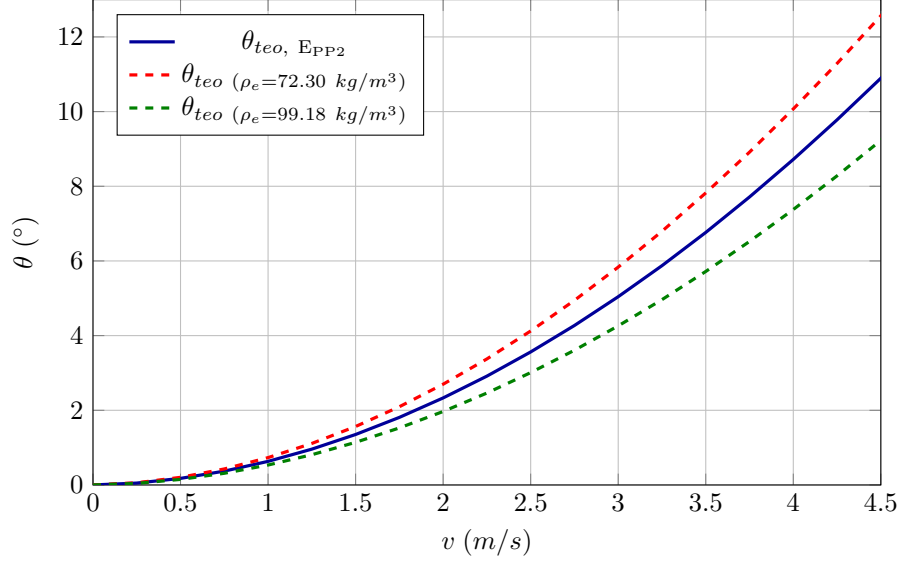


Figura 2.19: Desplazamiento angular teórico en función de la velocidad del viento para la esfera E_{PP2} y para esferas con densidades límite.

y prácticamente de forma nula de T_{amb} . Como consecuencia, solo es necesario ajustar el modelo físico-matemático en función de la P_{atm} cuando se utilice el instrumento. Cabe señalar que, al igual que en los resultados obtenidos en las pruebas de verificación del modelo, mientras menor sea la velocidad del viento, el error RMS también será menor.

Como se presentó en la Sección 2.2.4, al realizar la prueba-reprueba se concluyó que el dispositivo presenta una buena estabilidad temporal porque la desviación estándar relativa (DER) no superó el 3 % en ningún caso. Además, las mediciones tomadas dentro del rango de 0.05 m/s a 4.3 m/s son confiables porque las fluctuaciones de θ fueron menores a $\pm 1^\circ$. Finalmente, el factor de corrección seleccionado en la Sección 2.2.5. fue $k = 1.21$ porque, de entre todos los valores dentro del vector $\mathbf{F}_c$, este fue con el cual el error RMS se redujo más del 50 % a un valor de 0.54° . Al igual que en los resultados anteriores, el error aumenta con la velocidad del aire.

Capítulo 3

Cálculos de ventilación

En este capítulo se explica detalladamente el procedimiento para determinar si la ventilación de un recinto es adecuada o no, de acuerdo con el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022. Esto incluye todos los parámetros y cálculos relacionados con el grado de ventilación de un recinto, así como la introducción del desplazamiento proyectado y la diana de ventilación.

3.1. Grado de ventilación

Como se mencionó en el Capítulo 1, el grado de ventilación (ACH) es un parámetro que indica el número de veces que el volumen total de aire contenido en un recinto es renovado en una hora. En este capítulo se presenta el cálculo de dos tipos de grados de ventilación de un espacio: el **grado de ventilación mínimo necesario** (ACH_{mn}) y el **grado de ventilación real** (ACH_r). El ACH_{mn} indica el número mínimo necesario de renovaciones de aire por hora que debe tener el espacio para contar con una ventilación adecuada de acuerdo con la ASHRAE, mientras que el ACH_r indica cuántas renovaciones de aire por hora se dan realmente en el espacio con el gasto real de aire que se tiene. Ambos son parámetros importantes para determinar si la ventilación de un recinto es adecuada.

Para poder calcular estos parámetros, primero es necesario conocer el **gasto mínimo requerido de aire en la zona de respiración de un espacio**, Q_{bz} (L/s), definido en el punto 6.2.1.1 del estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022 [34]. Este parámetro se refiere al gasto de aire que se debe tener en el recinto para asegurar una ventilación adecuada. El valor de Q_{bz} depende de las características del recinto y se calcula como lo indica la Ecuación 3.1:

$$Q_{bz} = (R_p \times P_z) + (R_a \times A_z), \quad (3.1)$$

cuyo análisis de unidades es el siguiente:

$$\frac{L}{s} = \left(\frac{L}{s \cdot \text{persona}} \times \text{personas} \right) + \left(\frac{L}{s \cdot m^2} \times m^2 \right).$$

En la Ecuación 3.1, R_p es el **gasto de aire requerido por persona** (L/s·persona), P_z es el **número de personas dentro del espacio**, R_a es el **gasto de aire requerido por unidad de área** (L/s·m²), y A_z es la superficie o **área de piso del espacio** (m²). Los parámetros P_z y A_z dependen de los ocupantes del recinto y de sus dimensiones, respectivamente, y se deben medir, mientras que R_p y R_a dependen del uso que se le da al recinto. Los valores de R_p y R_a son valores de referencia proporcionados por la ASHRAE en el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022, específicamente en la Tabla 6-1. *Minimum Ventilation Rates for Breathing Zone* [34]. En la Fig. 3.1 se presenta un fragmento de la tabla original que muestra algunos valores de R_p y R_a para distintos recintos.

Table 6-1 Minimum Ventilation Rates in Breathing Zone

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_a	
	cfm/ person	L/s· person	cfm/ft ²	L/s·m ²
Animal Facilities				
Animal exam room (veterinary office)	10	5	0.12	0.6
Animal imaging (MRI/CT/PET)	10	5	0.18	0.9
Animal operating rooms	10	5	0.18	0.9
Animal postoperative recovery room	10	5	0.18	0.9
Animal preparation rooms	10	5	0.18	0.9
Animal procedure room	10	5	0.18	0.9
Animal surgery scrub	10	5	0.18	0.9
Large-animal holding room	10	5	0.18	0.9
Necropsy	10	5	0.18	0.9
Small-animal-cage room (static cages)	10	5	0.18	0.9
Small-animal-cage room (ventilated cages)	10	5	0.18	0.9

Figura 3.1: Fragmento de la Tabla 6-1. *Minimum Ventilation Rates for Breathing Zone* del estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022 [34]

3.1.1. Grado de ventilación mínimo necesario

Al dividir Q_{bz} entre el **volumen del espacio**, $V_{espacio}$ (m³), se obtiene el número mínimo necesario de renovaciones de aire por hora que debe tener el espacio para alcanzar una ventilación adecuada, es decir, el **grado de ventilación mínimo necesario**, ACH_{mn} (1/h). Este parámetro se calcula como se muestra en la Ecuación 3.2:

$$ACH_{mn} = 3.6 \frac{Q_{bz}}{V_{espacio}}, \quad (3.2)$$

donde

$$\frac{1}{h} = \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) \frac{\text{L}}{\text{m}^3}.$$

El valor constante de 3.6 es un factor de conversión de unidades de tiempo y de volumen. Este valor asegura que las unidades de ACH_{mn} sean las correctas siempre y cuando Q_{bz} y $V_{espacio}$ tengan las unidades que les corresponden de acuerdo con la información presentada previamente. Las unidades de ACH_{mn} son 1/h, es decir, el inverso de tiempo, el cual representa una frecuencia o una tasa de cambio temporal. En este caso, sus unidades reciben el nombre de cambios de aire por hora.

3.1.2. Grado de ventilación real

El **grado de ventilación real**, ACH_r (1/h), indica cuántas renovaciones de aire por hora se dan realmente en el espacio y se calcula al intercambiar Q_{bz} de la Ecuación 3.2 por el **gasto real de aire** que pasa por el espacio, Q_{real} (m³/s). El Q_{real} se calcula como el producto de un **coeficiente de descarga**, C_d , el área de abertura por donde entra o sale el aire, llamada **área libre** y representada como A_l (m²), y la componente de la **velocidad del viento** normal a esta área, denominada como v (m/s) [73, 74]. El ACH_r se calcula como se expresa en la Ecuación 3.3:

$$ACH_r = 3600 \frac{Q_{real}}{V_{espacio}} = 3600 \frac{C_d \cdot v \cdot A_l}{V_{espacio}}, \quad (3.3)$$

donde el valor constante de 3600 ayuda con la conversión de unidades de tiempo y cuyo análisis de unidades es el siguiente:

$$\frac{1}{h} = \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) \frac{1 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^3}.$$

Es importante mencionar que, además de las ventanas, el aire también puede pasar a través de otras aberturas como puertas, respiraderos, chimeneas, ductos, pequeños orificios y hasta grietas en las paredes [36]; y que cada una de estas aberturas tiene valores diferentes de C_d y A_l . A pesar de esto, en esta sección se hablará principalmente de las ventanas porque son las aberturas más comunes y de las cuales se tiene más información general en el contexto de la ventilación.

El coeficiente de descarga C_d indica la eficiencia con la que el flujo de aire pasa de un espacio a otro espacio a través de una abertura. Su valor depende de múltiples parámetros relacionados con la abertura en cuestión, como su geometría, tamaño y el número de Reynolds para una abertura, Re_a , el cual se calcula como lo indica la Ecuación 3.4:

$$Re_a = \frac{\rho_{aire} v D_h}{\mu_{aire}}, \quad (3.4)$$

donde D_h es el diámetro hidráulico de la abertura:

$$D_h = 4 \frac{A_l}{P}, \quad (3.5)$$

y donde P , a su vez, es su perímetro. El C_d tiende a estabilizarse en un valor casi constante para flujos a través de ventanas debido a sus formas y tamaños, así como a valores de $Re_a > 100$ [36].

Tanto el valor de C_d como el cálculo de A_l dependen del tipo de ventana que se tenga en el recinto. Según el sistema de abertura, las ventanas más comunes son corredizas y abatibles, las cuales se muestran en la Fig. 3.2, respectivamente. Para ventanas abatibles, el coeficiente de descarga depende del ángulo de abertura y del sentido del flujo, como se indica en la Tabla 3.1, mientras que para una ventana corrediza, se suele aproximar a un valor constante de 0.65 [80].

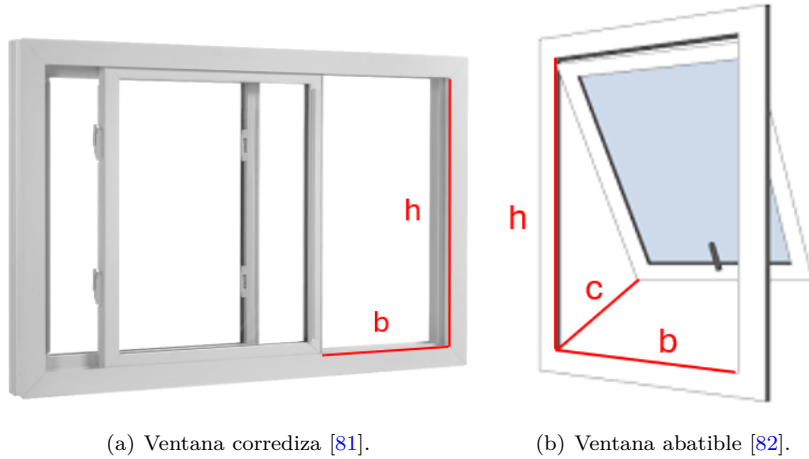


Figura 3.2: Ventanas más comunes según su tipo de abertura.

En la Fig. 3.2, b se refiere a la distancia base o el ancho de la ventana cuando se encuentra abierta y h es su altura. Para las ventanas abatibles también se tiene la variable c , que es la máxima distancia de abertura desde el marco hasta el borde de la ventana, o bien, α , que es el ángulo correspondiente a dicha abertura medido en grados. Para ventanas corredizas, el área libre se calcula de como se muestra en la Ecuación 3.6:

$$A_{l, \text{ ventana corrediza}} = (b \cdot h) \cdot n, \quad (3.6)$$

mientras que para ventanas abatibles el área libre se calcula de la siguiente forma:

$$A_{l, \text{ ventana abatible}} = (b \cdot h \cdot \sin \alpha) \cdot n, \quad (3.7)$$

donde

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{c}{2h} \right). \quad (3.8)$$

La letra n en este caso se utiliza para indicar la cantidad de ventanas abiertas exclusivamente por donde entra el aire, o bien, solamente por donde sale. Para calcular correctamente el gasto real de aire, es crucial considerar solamente las aberturas por donde el viento se desplace en el mismo sentido.

Tabla 3.1: Valores para el coeficiente de descarga obtenidos numéricamente para un flujo de aire a través de ventanas corredizas y abatibles [80].

	Ventana corrediza	Ventana abatible				
		Ángulo de abertura				
		15°	30°	45°	60°	90°
C_d (flujo de entrada)	0.65	0.22	0.38	0.49	0.56	0.63
C_d (flujo de salida)	0.65	0.21	0.34	0.45	0.54	0.65

En caso de contar con ventanas de distintos tipos o con diferentes configuraciones que las presentadas en este escrito, se recomienda leer a profundidad el capítulo 4 del libro *Science and technology of low Carbon design* [80], o bien, el escrito titulado *The potential effects of window configuration and interior layout on natural ventilation buildings: A comprehensive review* [83]. Adicionalmente, para flujo de aire a través de puertas, se recomienda revisar la tesis de maestría titulada *Air Infiltration through Building Entrances* [84].

3.2. Ventilación adecuada de un recinto

Es posible determinar si la ventilación de un recinto es adecuada o no simplemente mediante la comparación entre ACH_{mn} y ACH_r .

Si $ACH_{mn} \leq ACH_r$, la ventilación es adecuada.

Si $ACH_{mn} > ACH_r$, la ventilación no es adecuada.

Si la ventilación no es adecuada, esto se puede solucionar de distintas maneras. Entre ellas, la más recomendada es aumentar el área libre abriendo más ventanas y volver a calcular ACH_r , o bien, incrementar la velocidad del viento de entrada por medio de un ventilador. No obstante, cabe destacar que el uso del *indicador de ventilación de péndulo* no requiere conocer de manera previa la velocidad del flujo de viento. Al igualar ACH_{mn} y ACH_r , simplificar y dejar la ecuación resultante en términos de v , se obtiene la Ecuación 3.11.

$$ACH_{mn} = ACH_r \quad (3.9)$$

$$3.6 \frac{Q_{bz}}{V_{\text{espacio}}} = 3600 \frac{C_d \cdot A_l \cdot v}{V_{\text{espacio}}} \quad (3.10)$$

$$v = \frac{1}{1000} \frac{Q_{bz}}{C_d \cdot A_l} \quad (3.11)$$

Este valor de v en particular se trata de la velocidad del viento que garantiza el cumplimiento del número mínimo necesario de renovaciones de aire por hora y recibe el nombre de **velocidad mínima para una ventilación adecuada**, v_{mva} (m/s):

$$v_{mva} = \frac{1}{1000} \frac{Q_{bz}}{C_d \cdot A_l} = \frac{(R_p \times P_z) + (R_a \times A_z)}{1000 \cdot C_d \cdot A_l}, \quad (3.12)$$

donde

$$\frac{\text{m}}{\text{s}} = \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{persona}} \times \text{personas} \right) + \left(\frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \times \text{m}^2 \right)}{1 \cdot \text{m}^2}.$$

3.3. Desplazamiento proyectado

Con respecto al diseño del dispositivo experimental visto en la Sección 2.2.1, la medición de θ solo puede hacerse de manera paralela al flujo porque la posición del transportador no se puede modificar. En esta sección se introduce una forma alternativa para medir θ que le permite al péndulo moverse libremente. Esta consiste en proyectar el pivote (O) y la esfera a cualquier $\theta > 0^\circ$ sobre un plano horizontal debajo del péndulo, llamado plano de proyección (pp). Mediante una relación trigonométrica es posible determinar θ a partir de la distancia entre la proyección del centro de la esfera y la proyección del pivote como se ve en la Fig. 3.3. Estableciendo únicamente la longitud del filamento del péndulo (l), esta distancia recibe el nombre de **desplazamiento proyectado**, dp (m). Es de suma importancia que el plano de proyección sea completamente horizontal para asegurar una medición correcta de dp .

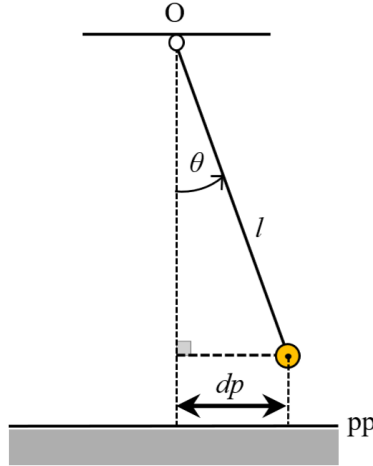


Figura 3.3: Proyección del desplazamiento angular da lugar al desplazamiento proyectado (dp).

El dp se calcula a partir de la siguiente relación trigonométrica:

$$\sin \theta = \frac{dp}{l}, \quad (3.13)$$

$$dp = l \cdot \sin \theta. \quad (3.14)$$

Al sustituir la ecuación del modelo físico-matemático corregido, $\theta_{teo, corr}$ (Ecuación 2.25), en la Ecuación 3.14, es posible relacionar a dp directamente con la velocidad del viento (v), como se muestra en la Ecuación 3.15:

$$dp = l \cdot \sin \left(1.21 \cdot \arctan \left(\left(\frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_D}} + 0.4 \right) \frac{3}{4} \rho_r Fr_D^2 \right) \right). \quad (3.15)$$

3.4. Diana de ventilación

El desplazamiento proyectado (dp) posibilita la medición de v sin restringir el movimiento del péndulo a una sola dirección. Por esto, es útil representar a dp como el radio de un círculo cuyo centro coincide con la proyección del pivote del péndulo. A su vez, múltiples valores de dp se visualizan como radios de círculos concéntricos que asemejan a una diana o blanco de tiro.

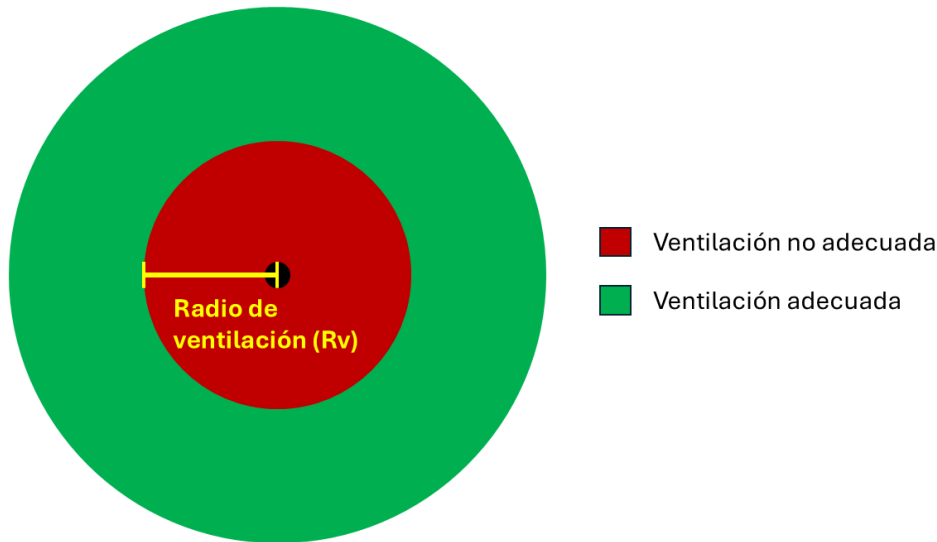


Figura 3.4: Diana de ventilación.

Mediante sus correspondientes valores de dp , es sencillo determinar si la velocidad del viento es menor o mayor que una velocidad de referencia. Al calcular el dp correspondiente a la v_{mva} , se obtiene el radio de un círculo que define el umbral entre una ventilación no adecuada y una ventilación adecuada. Este radio recibe el nombre de **radio de ventilación**, Rv . De esta manera se tienen dos círculos concéntricos, un círculo interno en color rojo que indica una ventilación no adecuada y un círculo externo en color verde que indica una ventilación adecuada. El radio del círculo externo puede ser tan grande como se requiera, siempre que sea mayor a Rv . A este conjunto de círculos se le llama **diana de ventilación** y se presenta en la Fig. 3.4.

Capítulo 4

Producto

En este capítulo se presenta el *indicador de ventilación de péndulo* como producto; se expone el diseño final del instrumento y los elementos que lo conforman, así como algunas recomendaciones de uso. Se presenta también el desarrollo de una aplicación que le otorga adaptabilidad al instrumento y un caso de estudio ejemplificando su uso paso a paso.

4.1. Diseño final y componentes

El diseño final del *indicador de ventilación de péndulo*, compuesto por un marco, el conjunto filamento-esfera y la diana de ventilación, se concibió con un enfoque en la práctica DIY para tener una amplia accesibilidad. El marco no posee tornillería y está pensado para construirse en un solo material si así lo desea el usuario. Este consiste en una base cuadrada, tres columnas de soporte y una plataforma superior de donde cuelga el conjunto filamento-esfera. El diseño CAD del marco se muestra en la Fig. 4.1 y un par de fotografías del prototipo armado se presentan en la Fig. 4.2.

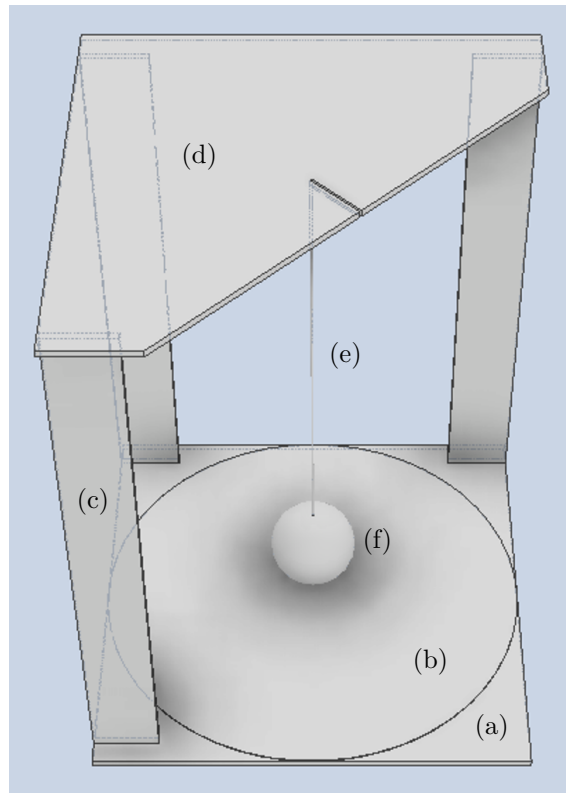


Figura 4.1: Diseño CAD final del marco para el *indicador de ventilación de péndulo*, donde (a) Base, (b) Diana de ventilación, (c) Columnas, (d) Plataforma superior, (e) Filamento y (f) Esfera.

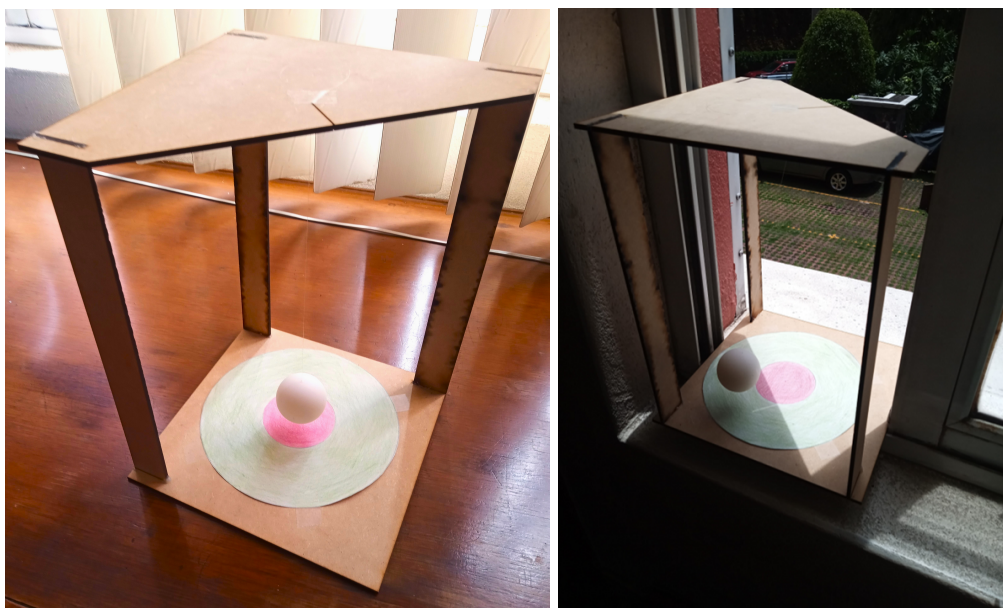
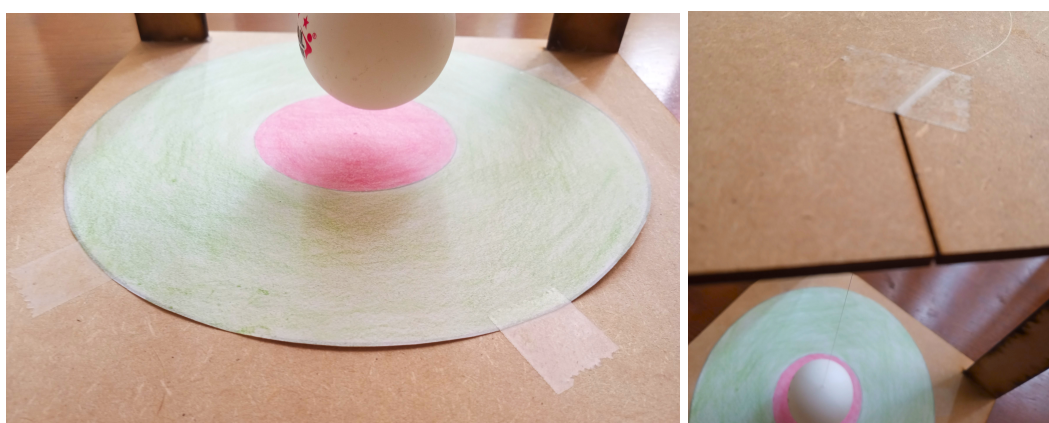


Figura 4.2: Prototipo del diseño final construido con MDF.

La diana de ventilación debe fijarse con cinta adhesiva a la base del dispositivo como se indica en la Fig. 4.3(a) de forma en que su centro coincida con la proyección del pivote del péndulo. De la misma manera, la plataforma superior del marco posee una pequeña ranura en donde se introduce el filamento para que la proyección del pivote del péndulo coincida con el centro de la base y el centro de la diana de ventilación. Ya que el filamento debe tener 0.2 m de longitud desde el pivote hasta la esfera, se recomienda dejar una longitud adicional para fijarlo a la plataforma superior con cinta adhesiva, como se muestra en la Fig. 4.3(b). Adicionalmente, la esfera debe perforarse con una aguja o un alfiler y en este agujero se debe introducir el extremo del filamento para pegarse con pegamento instantáneo. Si el filamento se pega de manera tangente a la superficie de la esfera, el funcionamiento del dispositivo será incorrecto. El resultado de esta unión debe verse como se muestra en la Fig. 4.4.



(a) Diana de ventilación pegada en la base.

(b) Filamento pegado en la plataforma superior.

Figura 4.3: Fijación de algunos componentes con cinta adhesiva.

Como se mencionó previamente, el marco del diseño final del *indicador de ventilación de péndulo* se puede construir a partir de un solo material si así lo desea el usuario. El material recomendado es MDF, que es un material fácil de cortar que se fabrica a partir de fibras de madera y resinas

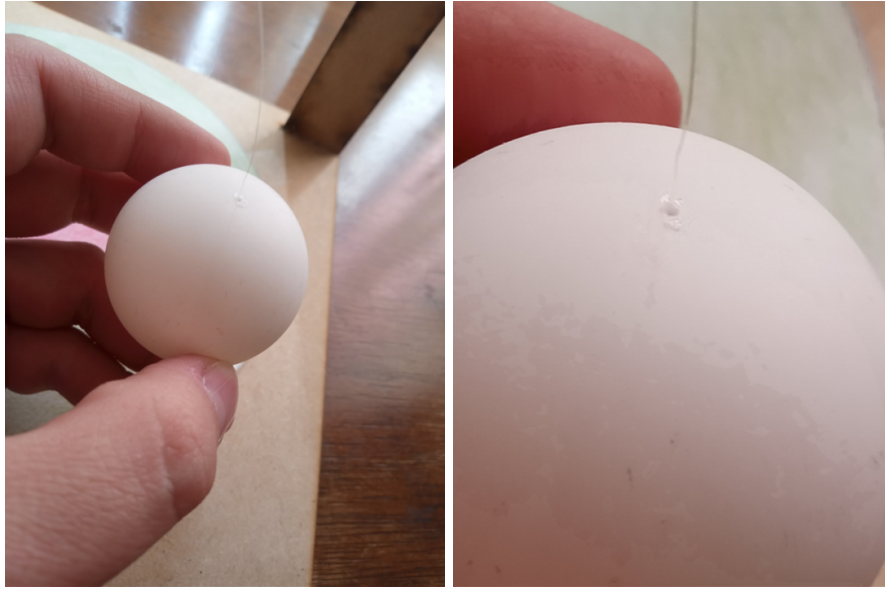
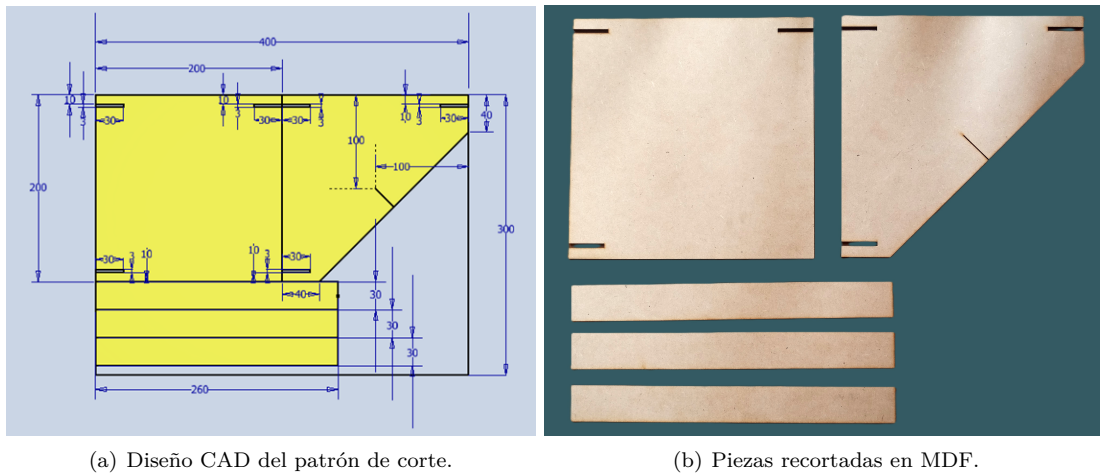


Figura 4.4: Unión entre el filamento y la esfera.

sintéticas, por lo que es más económico que la madera y es ideal para las creaciones DIY. Para esto se diseñó un patrón de corte, mostrado en la Fig. 4.5, del cual se pueden cortar fácilmente todas las piezas del marco. Solamente se requiere un panel de MDF de 0.4 m de largo, 0.3 m de ancho, y con 3×10^{-3} m de grosor; se recomienda usar pegamento instantáneo para fijar las piezas entre sí.

El costo promedio de una sola lámina o panel de MDF de estas dimensiones es de \$15 MXN, mientras que un carrete de hilo de nylon cuesta alrededor de \$18 MXN, y una pelota de ping-pong certificada por la ITTF cuesta entre \$20 MXN y \$60 MXN. Sin contar el precio del pegamento instantáneo y de la cinta adhesiva, el costo total de los materiales para construir un ejemplar del *indicador de ventilación de péndulo* es menor a \$100 MXN. El corte de las piezas de MDF requiere de un arco con segueta, pero también puede realizarse mediante corte con láser.



(a) Diseño CAD del patrón de corte.

(b) Piezas recortadas en MDF.

Figura 4.5: Patrón de corte para el marco.

4.2. Recomendaciones de uso

Como fue mencionado en repetidas ocasiones a lo largo de la tesis, para asegurar un flujo de aire en el espacio, se recomienda que haya por lo menos una abertura por donde entre el aire y otra por donde salga. Además, es mejor si las ubicaciones de estas aberturas se encuentran en la misma dirección que el viento dominante, como lo indican las rosas de viento proporcionadas por los servicios locales de monitoreo atmosférico [42].

El *indicador de ventilación de péndulo* se debe colocar frente a la ventana por donde pasa el flujo de aire, pero siempre dentro del recinto y sobre una superficie nivelada, ya sea posado sobre una mesa, o bien, directamente sobre el alféizar interior, también llamado repisa o antepecho de la ventana si es posible. Se recomienda mover los objetos que restrinjan el libre flujo de aire y que puedan causar obstrucciones o modificaciones en el flujo.

Para facilitar la lectura del desplazamiento proyectado de la esfera, para la cual se requiere identificar la proyección del centro de esta a partir de una estimación visual, se recomienda colocar una fuente de luz directamente por encima del arreglo filamento-esfera para poder ver la proyección de la esfera como una sombra de la misma sobre la diana de ventilación. Esto se puede hacer colocando una lámpara o la linterna de un teléfono inteligente sobre la plataforma superior del *indicador de ventilación de péndulo* dirigida hacia su base. Es importante mencionar que la posición y el tamaño de la sombra de la esfera serán ligeramente diferentes que las de la esfera real debido a la geometría de los rayos de luz. Debido a esto, es posible tener un pequeño error en la medición del desplazamiento proyectado de la esfera; sin embargo, de esta manera su medición es más sencilla y consistente que mediante la observación de la esfera.

4.3. Aplicación (Software)

El cálculo de la velocidad mínima para la ventilación adecuada (v_{mva}) y el radio de ventilación (R_v) para el recinto que el usuario desea ventilar involucra una gran cantidad de operaciones matemáticas engorrosas. Es por esto que se desarrolló una aplicación, es decir, un software o programa informático, en el entorno de programación AppDesigner de MATLAB. La aplicación se titula “RaVent Calc”, donde el usuario ingresa información requerida sobre el recinto y sobre la esfera utilizada en el *indicador de ventilación de péndulo* para determinar los valores de v_{mva} y R_v de una manera rápida y sencilla.

El diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4.6 describe el funcionamiento general de esta aplicación. De igual forma, se presenta una guía detallada sobre su uso a continuación:

1. Al ejecutar el software se despliega la ventana principal que presenta una breve descripción del software, así como la opción de abrir un glosario de términos y las instrucciones de uso haciendo clic derecho sobre el texto resaltado en color amarillo.
2. El usuario debe establecer la altitud a la que se encuentra el recinto por ventilar, la cual permite determinar la presión atmosférica y la densidad del aire. El usuario también debe especificar el diámetro y la masa de la esfera seleccionada, y el software indicará si se recomienda su uso o no, basándose en las densidades límite establecidas en la Sección 2.3. La aplicación ajusta el modelo físico-matemático a partir de esta información.
3. De una lista desplegable con múltiples recintos ordenados por categorías de uso, el usuario debe seleccionar aquel que más se asemeje al del recinto que desea ventilar, así como copiar en las casillas correspondientes los respectivos valores de gasto requerido por persona (R_p) y gasto requerido por unidad de área (R_a) del recinto seleccionado. La lista de estos recintos se obtuvo del estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022. El usuario también debe indicar el área de piso del recinto (A_z) y la cantidad de personas dentro de este (P_z). La aplicación calcula el gasto mínimo requerido en la zona de respiración (Q_{bz}) a partir de esta información.

4. El usuario debe seleccionar el tipo de ventana (corrediza o abatible), sus dimensiones (ancho, alto y abertura si aplica), y la cantidad de estas solamente por donde entra el aire, o bien, solamente por donde este sale. Esta información le permite al software determinar el área libre (A_l) y el coeficiente de descarga (C_d)¹.
5. Finalmente, el software calcula la velocidad mínima del viento para una ventilación adecuada (v_{mva}) y su desplazamiento proyectado correspondiente, es decir, el radio de ventilación (Rv). Se abre una ventana emergente donde se muestra un esquema de la diana de ventilación relacionada. Ya conociendo el valor de Rv , solo resta que el usuario dibuje o imprima la diana de ventilación adecuada para el recinto en cuestión.

Nota adicional: Si el usuario desea modificar cualquier valor ingresado, es posible hacerlo, pero se deberá asegurar de que el software calcule nuevamente los valores de v_{mva} y Rv bajo las condiciones actualizadas.

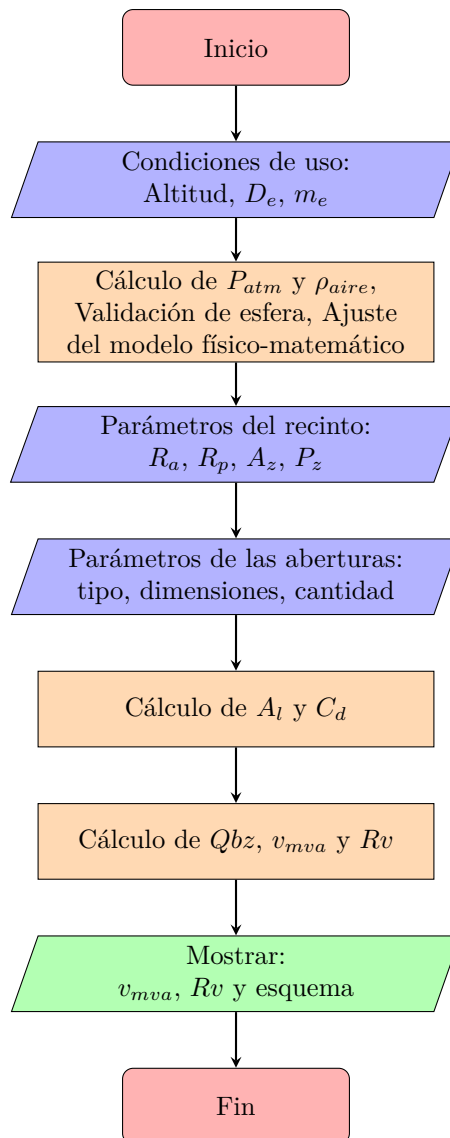


Figura 4.6: Diagrama de flujo del software “RaVent Calc”.

¹El cálculo de A_l y C_d para puertas o para ventanas que no sean corredizas ni abatibles no está disponible en esta versión de la aplicación.

4.4. Caso de estudio y uso de la aplicación

A modo de demostración, en esta sección se presenta un caso de estudio con un recinto real, así como el uso de la aplicación para obtener la diana de ventilación correspondiente. El recinto seleccionado para este ejemplo es el salón de clases D001 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En primer lugar, se ejecuta la aplicación “RaVent Calc”, cuya ventana principal se muestra en la Fig. 4.7. Para iniciar, es necesario hacer clic en el botón “1. Establecer condiciones de uso”. Se abrirá una ventana emergente como se muestra en la Fig. 4.8, donde se requiere establecer la altitud del recinto por ventilar y las características de la esfera por utilizar en el *indicador de ventilación de péndulo*. El recinto que se desea ventilar se encuentra en la Ciudad de México, cuya altitud es de aproximadamente 2240 msnm y la esfera por utilizar es una pelota de ping-pong certificada por la ITTF que mide 4.012 cm de diámetro y que tiene una masa de 2.83 g. A partir de la altitud se ajusta el modelo físico-matemático y los parámetros de la esfera por utilizar se encuentran dentro del rango aceptable, por lo que no hay ningún problema con su uso.

RaVent Calc

Esta herramienta calcula el valor del radio de ventilación para cualquier recinto a partir de los datos ingresados por el usuario. El radio de ventilación es un parámetro de referencia esencial para el uso del indicador de ventilación de péndulo.

Hacer click derecho aquí para ver el glosario de términos e información sobre el uso de esta aplicación.

1. Establecer condiciones de uso

Esfera: ✓

2. Seleccionar el tipo de recinto y copiar los valores de Rp y Ra correspondientes:

- Instalaciones de atención médica
- Instalaciones veterinarias
- ▼ Instalaciones educativas
 - Salón de Clases (Rp: 5, Ra: 0.6)
 - Biblioteca (Rp: 2.5, Ra: 0.6)
 - Laboratorio / Taller (Rp: 5, Ra: 0.9)
 - Teatro (Rp: 5, Ra: 0.3)
- Servicio de alimentos y bebidas

3. Calcular Ai y Cd

Ai (área libre) 0.30 m²

Cd (coef. de descarga) 0.46

4. Calcular Vmva y Rv

La velocidad mínima del viento para una ventilación adecuada (Vmva) es:

Vmva = 2.50 m/s

El Radio de Ventilación (Rv) es:

Rv = 1.53 cm

ver. 1.2

Figura 4.7: Ventana principal de la aplicación.

Establecer condiciones de uso

Introducir en la siguiente casilla la altitud (en msnm) en donde se utiliza el instrumento:

Altitud: 2240 msnm Presión Atmosférica: 77.155 kPa

Introducir el diámetro (en centímetros) y la masa (en gramos) de la esfera por utilizar:

Diámetro: 4.012 cm Densidad: 83.73 kg/m³ ✓

Masa: 2.83 g

La esfera por utilizar se encuentra dentro del rango aceptable.

Nota: Al hacer click en "Continuar" se actualizan los valores escritos.

Continuar

Figura 4.8: Ventana emergente donde se establecen las condiciones de uso del dispositivo.

En segundo lugar, de la lista desplegable de recintos se debe seleccionar la opción “Salón de Clases”, como se muestra en la Fig. 4.9(a), y se deben copiar los valores de gasto requerido por persona (R_p) y gasto requerido por área (R_a) de este recinto. Estos son $R_p = 5$ L/s-persona, y $R_a = 0.6$ L/s·m², y se deben escribir en sus casillas correspondientes. De igual manera, se debe escribir el número de personas en el recinto (P_z) y el área de piso de este (A_z) en las casillas siguientes. Este salón de clases está diseñado para albergar 60 estudiantes y tiene un área de piso de 75 m².

2. Seleccionar el tipo de recinto y copiar los valores de R_p y R_a correspondientes:

- Instalaciones de atención médica
- Instalaciones veterinarias
- ▼ Instalaciones educativas
 - Salón de Clases (R_p : 5, R_a : 0.6)**
 - Biblioteca (R_p : 2.5, R_a : 0.6)
 - Laboratorio / Taller (R_p : 5, R_a : 0.9)
 - Teatro (R_p : 5, R_a : 0.3)
- Servicio de alimentos y bebidas

Ingresar los valores de R_p y R_a del recinto seleccionado en las casillas siguientes, así como los valores de A_z y P_z :

R_p L/s-personas

R_a L/s·m²

A_z (área de piso) m²

P_z (# de personas) personas

(a) Lista de recintos.
(b) Casillas de R_p , R_a , A_z y P_z .

Figura 4.9: Selección del tipo de recinto y el llenado de casillas para el cálculo de Q_{bz} .

A continuación, se requiere hacer clic en el botón “**3. Calcular A_l y C_d** ”. Aparecerá una ventana emergente donde se calcula el área libre (A_l) del recinto y el coeficiente de descarga (C_d), como se muestra en la Fig. 4.10. En el salón D001 se tiene un total de 10 ventanas abatibles, de las cuales solo dos están abiertas y son por donde ingresa el flujo de aire ($n = 2$). Estas ventanas miden 50.5 cm de alto (h) y 46 cm de ancho (b), mientras que su abertura (c) mide 35 cm. Después, se debe hacer clic en el botón “**Calcular A_l y C_d** ” para que el software haga los cálculos necesarios. De acuerdo con la aplicación, A_l es igual a 0.30 m² y el C_d correspondiente es de 0.46.

Figura 4.10: Ventana emergente donde se calcula el área libre y el coeficiente de descarga.

Finalmente, se hace clic en el botón “**4. Calcular V_{mva} y R_v** ”, con lo cual se calcula la velocidad mínima para una ventilación adecuada (v_{mva}) y el radio de ventilación (R_v) como se presenta en la Fig. 4.11. El resultado obtenido es:

$$v_{mva} = 2.50 \frac{m}{s}, \quad (4.1)$$

$$R_v = 1.53 \text{ cm}. \quad (4.2)$$

4. Calcular Vmva y Rv

La velocidad mínima del viento para una ventilación adecuada (Vmva) es:

Vmva = 2.50 m/s

El Radio de Ventilación (Rv) es:

Rv = 1.53 cm

ver. 1.2

Figura 4.11: Cálculo de v_{mva} y Rv .

Ahora solo resta que el usuario dibuje o imprima un círculo con un radio de 1.53 cm para tener la diana de ventilación correcta, como lo indica el esquema en la Fig. 4.12.

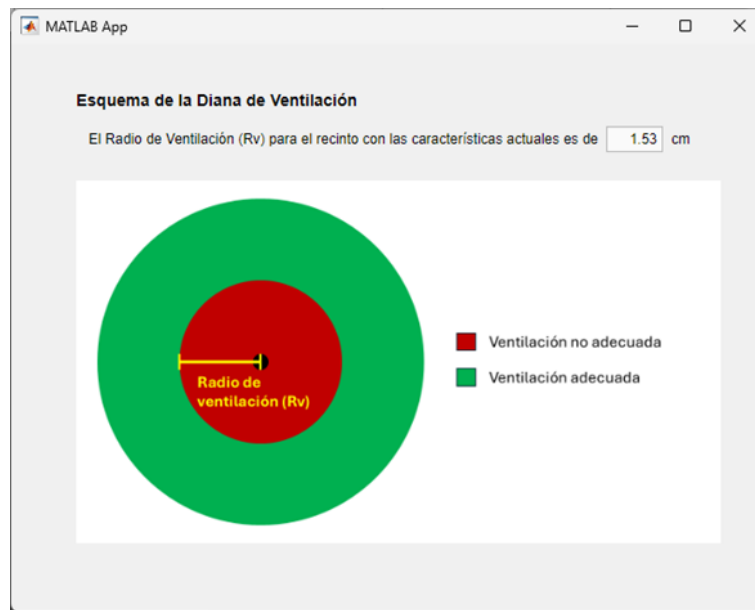


Figura 4.12: Ventana emergente donde se muestra el esquema de la diana de ventilación.

Como conclusión a este ejemplo, para que el salón de clases D001 tenga una ventilación adecuada bajo las condiciones establecidas, es necesario que la velocidad del viento que ingresa al recinto por cualquiera de las dos ventanas abiertas supere 2.50 m/s, con lo cual el desplazamiento proyectado de la esfera será mayor al radio de ventilación, el cual mide 1.52 cm. A partir de este radio se puede elaborar fácilmente la diana de ventilación, la cual se instala en la base del *indicador de ventilación de péndulo*.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis con relación a todo el desarrollo del *indicador de ventilación de péndulo*. Asimismo, se introducen algunas sugerencias para una posible expansión en el tema.

5.1. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos establecidos y los resultados obtenidos a lo largo de esta tesis, queda concluido el diseño y desarrollo de un *indicador de ventilación de péndulo*. A partir de una problemática actual relacionada con la salud y el bienestar de las personas, se identificó un área de oportunidad para contribuir con el desarrollo de tecnología accesible orientada a la ventilación de recintos. Tomando inspiración del anemómetro de pelota de ping-pong, se seleccionó un péndulo simple como el sistema físico por utilizar y se formuló su modelo físico-matemático, relacionando de manera exitosa su desplazamiento angular con la velocidad del viento que incide sobre este.

Se fabricó un dispositivo experimental que permitió efectuar una serie de pruebas de forma práctica y versátil mediante las cuales se determinó que el modelo físico-matemático, corregido solamente por un factor de $k = 1.21$, concuerda con el comportamiento experimental del instrumento con un error RMS inferior a 0.55° . Esta relación se comprobó para velocidades inferiores a 4.3 m/s, siempre y cuando se utilice un tramo de 0.2 m de hilo de nylon como filamento y una pelota de ping-pong certificada por la ITTF como esfera. El error obtenido se traduce en una sobreestimación del valor deseado del grado de ventilación de aproximadamente 0.1 ACH para una velocidad de 4.3 m/s y se incrementa para velocidades menores, por ejemplo, es de 0.3 ACH para una velocidad de 2 m/s y de 0.65 ACH para 1 m/s. Además, se determinó que el dispositivo cuenta con estabilidad temporal y que el efecto de la presión atmosférica en el comportamiento del péndulo es considerable, mientras que el de la temperatura ambiente es mínimo.

Se desarrolló una metodología basada en el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2022 y en las características del recinto que se desea ventilar que permite calcular la velocidad necesaria del viento para alcanzar una ventilación adecuada, así como su desplazamiento proyectado asociado, es decir, el radio de ventilación. Se propuso un diseño final para el instrumento, incluyendo sus componentes, proceso de fabricación y costo; todo con un enfoque en la práctica DIY y una alta accesibilidad para todos los usuarios. Adicionalmente, se desarrolló una aplicación que realiza todos los cálculos requeridos para adaptar el instrumento a cualquier recinto de manera sencilla. La última sección del objetivo de la tesis, referente al hardware libre, se mantiene como un objetivo pendiente, el cual se buscará completar como parte del trabajo a futuro.

Es importante mencionar que esta tesis toma al grado de ventilación como único criterio para caracterizar la ventilación, pero existen otros parámetros importantes como la calidad del aire y el desempeño de la ventilación que también se deben tomar en cuenta. Este es un trabajo con fines académicos basado en el trabajo previo de otras instituciones o personas, por lo que su uso queda a discreción del usuario.

5.2. Trabajo a futuro

En este subcapítulo se mencionan algunas sugerencias de continuación o expansión del tema relacionadas con el *indicador de ventilación de péndulo* que se encuentran fuera de lo contemplado en esta tesis.

En primer lugar, aunque el dispositivo *indicador de ventilación de péndulo* cumple con el objetivo de señalar si la ventilación en un recinto es adecuada, en su estado actual no resulta apropiado emplearlo para evaluar el riesgo de contagio de enfermedades de transmisión aérea. Para ello, es necesario llevar a cabo pruebas adicionales que validen su funcionamiento conforme a criterios y estándares específicos establecidos por organizaciones o instituciones de salud o de atención médica. Dicho procedimiento excede el alcance de la presente tesis y se propone como una posible línea de trabajo futuro.

En la Sección 2.2.5, los resultados de las pruebas de verificación evidencian que mientras mayor es la densidad de la esfera, hablando de esferas de 4 cm de diámetro, el error RMS obtenido es menor a expensas de una menor resolución, y viceversa. Estos efectos en el comportamiento del péndulo se encuentran relacionados con la inercia de la esfera y el flujo de aire. De las esferas probadas, E_{PP2} fue la que presentó el menor error RMS, pero se propone realizar un análisis más profundo para determinar el valor de densidad de la esfera que minimice este error y maximice la resolución del instrumento en el rango de velocidad indicado. Al establecer restricciones para estos parámetros, es posible calcular el valor óptimo para la densidad de la esfera bajo estas condiciones y, como resultado, se habrá encontrado la esfera ideal para el instrumento. Es importante mencionar que el resultado de este análisis podría cumplirse con geometrías distintas a una esfera para el cuerpo suspendido.

En la Sección 4.3 se presenta la aplicación titulada “RaVent Calc”, la cual le da adaptabilidad al *indicador de ventilación de péndulo*. Esta aplicación fue creada utilizando la herramienta App-Designer de MATLAB por alguien no especializado en el desarrollo de software. Por esta razón, existen limitaciones con respecto a su accesibilidad, diseño y funcionalidad que pueden ser mejoradas. Se propone exportar o recrear la aplicación en otro lenguaje de programación o como sitio web; esto con el fin de crear un diseño más atractivo y coherente para los usuarios en general, así como para reducir la cantidad de espacio de almacenamiento que ocupa gracias a la instalación adicional del compilador “Matlab Runtime”. Con respecto a la funcionalidad de la aplicación, se propone aumentar el número de opciones elegibles para las aberturas por donde pasa el aire, así como agregar una herramienta que genere digitalmente la diana de ventilación obtenida para que el usuario pueda simplemente imprimirla en lugar de dibujarla.

Se propone la creación de variantes del *indicador de ventilación de péndulo* con distintos niveles de equipamiento; esto es, versiones del dispositivo que se distinguen entre sí por las características, accesorios y mejoras que incluyen. Mientras que la versión más accesible puede ser la versión propuesta en esta tesis, se proponen para trabajo a futuro variantes que incluyan diseños alternativos para el marco, una fuente de luz integrada, o bien, sensores de presencia instalados para poder determinar el desplazamiento proyectado de la esfera sin la necesidad de depender completamente de la estimación visual del usuario, entre otras opciones. En la Fig. 5.1 y en la Fig. 5.2 se muestra una fotografía que ejemplifica esta propuesta.

La implementación de sensores posibilita la opción de registrar el desplazamiento proyectado de la esfera cada cierto periodo de tiempo en un ordenador para posteriormente calcular no solo la velocidad promedio del viento, sino también su dirección predominante y el grado de ventilación. Otra posible opción relacionada con la implementación de sensores es la creación de un sistema que alerte a los usuarios cuando el desplazamiento proyectado de la esfera se encuentre dentro o fuera de cierto intervalo. De este modo, mientras el desplazamiento proyectado de la esfera no supere el radio de ventilación, se mantendrá encendido un foco o un diodo de color rojo, o se hará sonar una alarma sonora, por ejemplo.

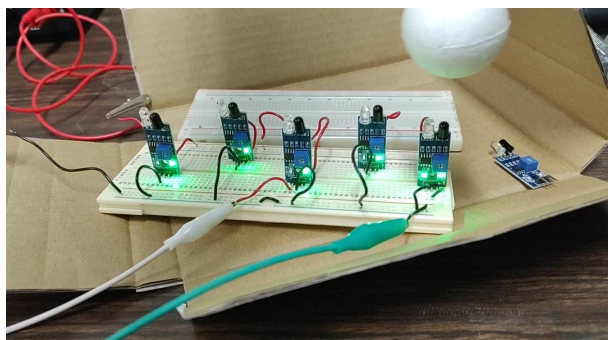


Figura 5.1: Sensores infrarrojos.

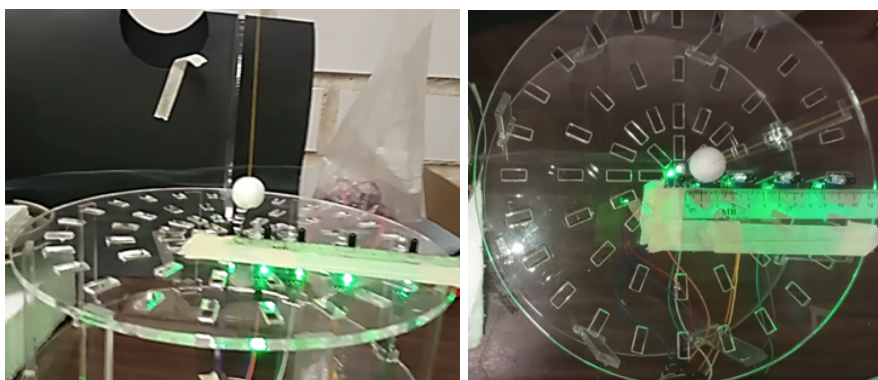


Figura 5.2: Variante del *indicador de ventilación de péndulo* con un marco alternativo fabricado con acrílico y con sensores infrarrojos instalados en la base.

Con relación al hardware libre, se propone la venta y distribución de los materiales requeridos para construir el *indicador de ventilación de péndulo* y sus posibles variantes, así como un instructivo de armado y una copia de la versión actual de la aplicación “RaVent Calc” o versiones posteriores de esta, ya sea en físico o por internet. Para lograr esta propuesta, así como la anterior sobre las variantes del dispositivo, es necesario llevar a cabo los registros pertinentes para la protección de propiedad industrial e intelectual, entre otras cosas.

Bibliografía

- [1] Lawrence J. Schoen. Guidance for building operations during the COVID-19 pandemic. *ASH-RAE journal*, 5:3, 2020.
- [2] Centers for Disease Control and Prevention. Improving Ventilation In Buildings, 2023. URL <https://archive.cdc.gov/#/details?url=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/improving-ventilation-in-buildings.html>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [3] Gobierno de México. Secretaría de Salud - Infecciones Respiratorias Agudas (IRAS), 2015. URL <https://www.gob.mx/salud/articulos/infecciones-respiratorias-agudas-iras>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [4] Yuetong Zhang, Sripriya Nannu S., William B. Vass, John A. Lednicky, Z. Hugh Fan, Duzgun Agdas, Robert Makuch, and Chang-Yu Wu. Air change rate and SARS-CoV-2 exposure in hospitals and residences: A meta-analysis. *Aerosol Science and Technology*, 58(3):217–243, 2024.
- [5] David W. Etheridge and Mats Sandberg. *Building Ventilation: Theory and Measurement*, volume 50. John Wiley & Sons Chichester, UK, 1996.
- [6] United States Environmental Protection Agency. Ventilation and Respiratory Viruses, 2024. URL <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/ventilation-and-respiratory-viruses>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [7] Centers for Disease Control and Prevention. How to Protect Yourself and Others, 2023. URL <https://archive.cdc.gov/#/details?url=https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/prevention.html>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [8] Raymond Tellier. COVID-19: the case for aerosol transmission. *Interface Focus*, 12(2): 20210072, 2022.
- [9] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire, 2025. URL <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>. Último acceso: 6 de mayo de 2025.
- [10] Secretaría de Salud. RECOMENDACIONES PARA PERSONAL DE SALUD, 2020. URL <https://www.gob.mx/salud/documentos/informacion-para-personal-de-salud/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [11] Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. PROTOCOLO DE SANIDAD PARA LAS ACTIVIDADES UNIVERSITARIAS, 2022. URL <https://www.publicaciones.unam.mx/servicios/es/protocolo-de-sanidad>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [12] Naix'ieli Castillo. Coronavirus. Cómo lograr una buena ventilación para el retorno a las actividades, 2021. URL <https://ciencia.unam.mx/leer/1150/>

[como-lograr-una-buena-ventilacion-para-el-retorno-a-las-actividades](#). Último acceso: 22 de mayo de 2025.

- [13] Ernesto A. Svarch Pérez. NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O₃). Valores normados para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2021. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [14] Ernesto A. Svarch Pérez. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2021. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [15] José A. Novelo Baeza. NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2019. URL https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [16] Ernesto A. Svarch Pérez. NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2021. URL https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [17] Mercedes Juan López. PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, partículas suspendidas totales (PST). Valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 1994. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4661343&fecha=18/01/1994#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [18] Ernesto A. Svarch Pérez. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2021. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [19] Ernesto A. Svarch Pérez. NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población., 2021. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634085&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [20] Sergio Reyes Luján. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-034-SEMARNAT-1993 QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN, 2003. URL <https://>

[//www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1185/1/nom-034-semarnat-1993.pdf](https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1185/1/nom-034-semarnat-1993.pdf). Último acceso: 20 de marzo de 2025.

- [21] Sergio Reyes Luján. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-035-SEMARNAT-1993 QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES EN EL AIRE AMBIENTE Y EL PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN, 2003. URL <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1215/1/nom-035-semarnat-1993.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [22] Sergio Reyes Luján. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-SEMARNAT-1993 QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN, 2003. URL <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1223/1/nom-036-semarnat-1993.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [23] Sergio Reyes Luján. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-037-SEMARNAT-1993 QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE BIÓXIDO DE NITRÓGENO EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN, 2003. URL <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/noms/NOM-037-SEMARNAT-1993.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [24] Sergio Reyes Luján. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-038-SEMARNAT-1993 QUE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE BIÓXIDO DE AZUFRE EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN, 2003. URL <https://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-038-SEMARNAT-1993.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [25] Sandra D. Herrera Flores. NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire., 2012. URL <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6656/1/nom-156-semarnat-2012.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [26] Javier Lozano Alarcón. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-STPS-2008, Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad., 2008. URL <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3540/stps/stps.htm>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [27] Arsenio Farell Cubillas. NORMA Oficial Mexicana NOM-016-STPS-1993, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo referente a ventilación., 1994. URL https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4711721&fecha=06/07/1994#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [28] Germán E. Fajardo Dolci. NORMA Oficial Mexicana NOM-016-SSA3-2012, Que establece las características mínimas de infraestructura y equipamiento de hospitales y consultorios de atención médica especializada., 2013. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284306&fecha=08/01/2013#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [29] Jesús A. Navarrete Prida. NORMA Oficial Mexicana NOM-033-STPS-2015, Condiciones de seguridad para realizar trabajos en espacios confinados, 2012. URL <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6656/1/nom-156-semarnat-2012.pdf>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.

- [30] Secretaría de Economía. DECLARATORIA de vigencia de la Norma Mexicana NMX-C-7730-ONNCCE-2018., 2019. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5564192&fecha=26/06/2019#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [31] Secretaría de Economía. AVISO de consulta pública del Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-C-577-ONNCCE-2020., 2021. URL https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5630816&fecha=24/09/2021#gsc.tab=0. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [32] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Criterios de Evaluación de Calidad Ambiental, 2020. URL <https://onncce.org.mx/criterios-de-evaluacion-de-calidad-ambiental>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [33] American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. About ASHRAE, 2024. URL <https://www.ashrae.org/about>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [34] American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality, 2022. URL https://store accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-62-1-2022?product_id=2501063.
- [35] American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2021: Ventilation of Health Care Facilities, 2021. URL https://store accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-170-2021?product_id=2212971.
- [36] David W. Etheridge. *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [37] United States Environmental Protection Agency. Indoor Air Quality, 2024. URL <https://www.epa.gov/report-environment/indoor-air-quality>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [38] International Organization for Standardization. ISO 17772-1:2017 Energy performance of buildings — Indoor environmental quality, 2023. URL <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/04/60498.html>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [39] International Organization for Standardization. ISO/TR 17772-2:2018 Energy performance of buildings — Overall energy performance assessment procedures, 2018. URL <https://www.iso.org/standard/68228.html>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [40] International Organization for Standardization. Better buildings, 2021. URL <https://www.iso.org/news/ref2642.html>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [41] Peter E.J. Baldwin and Andrew D. Maynard. A Survey of Wind Speeds in Indoor Workplaces. *The Annals of occupational hygiene*, 42(5):303–313, 1998.
- [42] Dirección de Monitoreo Atmosférico. Aire, 2025. URL <https://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [43] Royal Meteorological Society. The Beaufort Wind Scale, 2024. URL <https://www.rmets.org/metmatters/beaufort-wind-scale/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [44] Florence Nightingale and Mary O’Neil Mundinger. Florence Nightingale: measuring hospital care outcomes: excerpts from the books Notes on matters affecting the health, efficiency, and hospital administration of the British Army founded chiefly on the experience of the late war and Notes on hospitals. (*No Title*), 1999.
- [45] Florence Nightingale. Notes on Nursing: What it is and what it is not. Philadelphia: Edward Stern, Churchill Livingstone. *Inc.(Original work published 1859.)*, 1946.

- [46] American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. *2023 ASHRAE Handbook - HVAC Applications*. ASHRAE, 2023.
- [47] James Atkinson, Yves Chartier, Carmen L. Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li, and Wing-Hong Seto. Natural ventilation for infection control in health-care settings-World Health Organization. *Technical report*, 2009.
- [48] Teledyne FLIR. HVAC & Air Quality, 2024. URL <https://www.flir.com/browse/professional-tools/hvac-amp-air-quality/?f4673=Extech&page=2>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [49] Teledyne Flir. Extech HD350, 2024. URL <https://www.flir.com/products/hd350/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [50] Teledyne Flir. Extech 407113, 2024. URL <https://www.flir.com/products/407113/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [51] DANTEC Dynamics. ComfortSense Mini, 2023. URL <https://www.dantecdynamics.com/solutions/thermal-comfort/comfortsense-mini/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [52] Teledyne Flir. Extech 407123, 2024. URL <https://www.flir.com/products/407123/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [53] PCE Instruments. Anemómetro PCE-ADL 11, 2024. URL https://www.pce-instruments.com/mexico/instrumento-medida/medidor/anemometro-pce-instruments-anem%C3%B3metro-pce-adl-11-det_6293554.htm. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [54] TSI. Alnor Balometer Capture Hood EBT731, 2024. URL <https://tsi.com/products/ventilation-test-instruments/alnor/alnor-capture-hoods/alnor-balometer-capture-hood-ebt731/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [55] Wikipedia, La enciclopedia libre. Cataviento, 2020. URL <https://es.wikipedia.org/wiki/Cataviento>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [56] Wikipedia, La enciclopedia libre. Manga de viento, 2024. URL https://es.wikipedia.org/wiki/Manga_de_viento. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [57] Wikipedia, La enciclopedia libre. Veleta, 2024. URL <https://es.wikipedia.org/wiki/Veleta>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [58] Wikipédia, l'encyclopédie libre. Anémomètre de Daloz, 2025. URL http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=An%C3%A9mom%C3%A8tre_de_Daloz&oldid=226993428. Último acceso: 20 de octubre de 2025.
- [59] Ryozo Ishiwata. *Illustrated Fluid Dynamics Trivia*. Natsume Publishing, 2007.
- [60] JSME FED. 流れの速さを測る1 (ピンポン玉風速計) [Video], 2022. URL <https://www.youtube.com/watch?v=GUmXqIH49og>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [61] Wikimedia Commons. File:Alpines Museum München - Windmesser.JPG — Wikimedia Commons, the free media repository, 2023. URL https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Alpines_Museum_M%C3%BCnchen_-_Windmesser.JPG&oldid=789665942. Último acceso: 20 de octubre de 2025.
- [62] The Mars Simulation Laboratory, University of Aarhus. The Telltale Project, 2008. URL <https://web.archive.org/web/20120220080017/http://www.marslab.dk/TelltaleProject.html>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.

- [63] Wikipedia, La enciclopedia libre. Hágalo usted mismo, 2024. URL https://es.wikipedia.org/wiki/H%C3%A1galo_usted_mismo. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [64] Tobias Wenzel. Open hardware: From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment. *PLoS Biology*, 21(1), 2023.
- [65] OpenFlexure. OpenFlexure Microscope, 2022. URL <https://openflexure.org/projects/microscope/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [66] Adam Rogers. Could a Janky, Jury-Rigged Air Purifier Help Fight Covid-19?, 2020. URL <https://www.wired.com/story/could-a-janky-jury-rigged-air-purifier-help-fight-covid-19/>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [67] Jim Rosenthal. A Variation on the “Box Fan with MERV 13 Filter” Air Cleaner, 2020. URL <https://www.texairfilters.com/a-variation-on-the-box-fan-with-merv-13-filter-air-cleaner/>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [68] Gabrielle Emanuel. DIY Air Filters For Classrooms? Experts Are Enthusiastic — And A Citizen Scientist Makes It Easy, 2021. URL <http://bit.ly/4edSmNl>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [69] Eugene Hecht. *Physics: Algebra / Trig*. Brooks/Cole, 1994.
- [70] Wikipedia, La enciclopedia libre. Péndulo físico, 2024. URL https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo_f%C3%ADsico. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [71] Wikipedia, La enciclopedia libre. Péndulo simple, 2024. URL https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A9ndulo_simple&oldid=163617448. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [72] Walter R.A. Goossens. Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres. *Powder Technology*, 352:350–359, 2019.
- [73] Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, and Sofía F. Sknarina. *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana, 2018.
- [74] Frank M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2011.
- [75] Frank M. White and Joseph Madjalani. *Viscous Fluid Flow [4th ed.]*. McGraw Hill, New York, USA, 2022.
- [76] Neha Aggarwal. ITTF President Thomas Weikert ensures work to improve quality of balls, 2017. URL <https://www.ittf.com/2017/03/17/ittf-president-thomas-weikert-ensures-work-improve-quality-balls/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [77] Pochteca Chile. ¿Qué es el poliestireno expandido?, 2021. URL <https://chile.pochteca.net/que-es-el-poliestireno-expandido-eps/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [78] Gobierno de México. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia, 2025. URL <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [79] Lucía M. Reidl-Martínez. Confiabilidad en la medición. *Investigación en Educación Médica*, 2(6):107–111, 2013.

- [80] Darren Robinson. *Science and technology of low Carbon design*. Sheffield, UK, 2024.
- [81] PNGWING. Ventana de reemplazo ventana de ventana ventana corrediza ventana de guillotina ventana, ventana, ángulo, mueble, rectángulo png, s.f. URL <https://www.pngwing.com/es/free-png-xcons>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [82] Ventana10. Tipos de ventanas y puertas abatibles: ventajas y desventajas, s.f. URL <https://ventana10.es/tipos-ventanas-puertas-abatibles/>. Último acceso: 20 de marzo de 2025.
- [83] Xin Yin, Mohammed W. Muhieldeen, Ruzaimah Razman, Jonathan Yong Chung Ee, and Meng Choung Chiong. The potential effects of window configuration and interior layout on natural ventilation buildings: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, 23, 2024.
- [84] Niklas Karlsson. Air Infiltration through Building Entrances. Master's thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 2013.

Apéndice A

Especificaciones de las pruebas experimentales

En este apartado se especifican los equipos, herramientas y procedimientos utilizados durante las pruebas de verificación del modelo y las pruebas de confiabilidad. Todas estas pruebas fueron realizadas en el túnel de viento del Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM entre el mes de junio de 2023 hasta el mes de mayo de 2025. En las pruebas de verificación del modelo para las esferas E_{U1} , E_{U2} y E_{PP1} se utilizó un anemómetro de hilo caliente EXTECH 407123 para medir directamente la velocidad del viento. En el caso de las pruebas de verificación del modelo para la esfera E_{PP2} , así como para las pruebas de confiabilidad con la misma esfera, se utilizó un tubo de Prandtl conectado mediante mangueras a un transductor de presión diferencial Setra, modelo 264, con rango de medición de ± 0.25 inWC, al que se suministraron 9 V de corriente directa para su funcionamiento. La variable que se midió con este instrumento fue la presión dinámica en forma de voltaje, por lo que también se utilizó un multímetro.

Se utilizó una hoja de calibración proporcionada por el fabricante del transductor de presión para determinar la presión dinámica correspondiente a los valores medidos de voltaje, mientras que la velocidad del viento se calculó utilizando una versión simplificada de la ecuación de Bernoulli, $v = \sqrt{2(\Delta P)/\rho_{aire}}$, donde ΔP es la diferencia entre la presión estática y la presión de estancamiento, cuyo valor corresponde a la presión dinámica. La densidad del aire fue calculada con la ley de gas ideal para las condiciones ambientales del día de las mediciones; para ello se utilizó un barómetro de mercurio y un termómetro de mercurio para medir la presión atmosférica y la temperatura ambiente, respectivamente. El arreglo utilizado se muestra en la Fig. A.1.

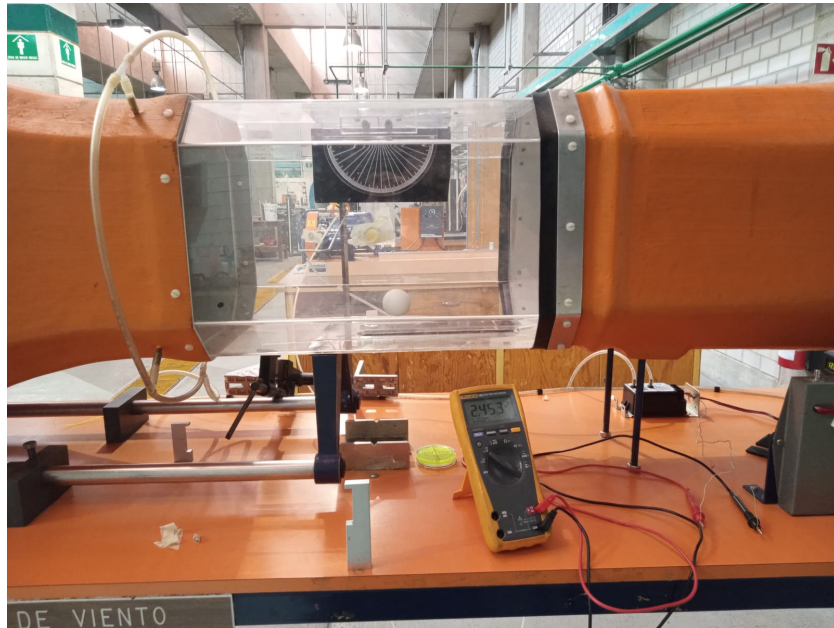


Figura A.1: Arreglo utilizado durante las pruebas con E_{PP2} .

Apéndice B

Registros de propiedad industrial e intelectual

En este apartado se presenta la información relacionada con los registros de propiedad industrial e intelectual del dispositivo y del software, respectivamente.

B.1. Modelo de utilidad

A la fecha de publicación de esta tesis, se está llevando a cabo el registro del dispositivo *indicador de ventilación de péndulo* a través de la figura jurídica de modelo de utilidad ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) a través de la Dirección de Transferencia Tecnológica de la Coordinación de Vinculación y Transferencia Tecnológica (CVTT) de la UNAM. Se cuenta con asesoría del Ing. Guillermo Medellín Razo y el I.Q. Salvador Enrique Morales Herrera para este procedimiento.

B.2. Aplicación (Software)

A la fecha de publicación de esta tesis, se está llevando a cabo el registro de derechos de autor de la aplicación titulada “RaVent Calc” ante el Instituto Nacional de Derechos de Autor (INDAUTOR) a través de la Dirección de Transferencia Tecnológica de la Coordinación de Vinculación y Transferencia Tecnológica (CVTT) de la UNAM. Se cuenta con asesoría del Ing. Guillermo Medellín Razo y el I.Q. Salvador Enrique Morales Herrera para este procedimiento.