

CFD COMO HERRAMIENTA EDUCATIVA Y CIENTÍFICA PARA EL DISEÑO DE TÚNELES DE VIENTO EN LA ESPOCH

CFD AS AN EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC TOOL FOR THE DESIGN OF WIND TUNNELS IN THE ESPOCH

Luis Brayan Mera Landeta¹

{luis.mera@esPOCH.edu.ec}

Fecha de recepción: 02/12/2025 / Fecha de aceptación: 17/12/2025 / Fecha de publicación: 06/01/2026

RESUMEN: El túnel de viento es un instrumento ampliamente utilizado en los últimos años y resulta esencial en el análisis aerodinámico; sin embargo, su aplicación en el sistema educativo ha sido insuficiente. Por esta razón, es importante analizar un túnel de viento cerrado. El objetivo de esta investigación es simular un túnel de viento cerrado mediante la dinámica de fluidos computacionales (CFD), considerando los parámetros ambientales de Riobamba, con la finalidad de valorar su desempeño y eficacia. El estudio cuenta con un enfoque mixto y se utilizan métodos como el analítico, sintético, hipotético y deductivo. Además, posee una población que corresponde a los parámetros ambientales de la ciudad de Riobamba, proporcionados por el grupo GEAA de la ESPOCH, e incluyen altitud, temperatura, presión atmosférica, densidad, humedad relativa, velocidad del viento y gravedad. La muestra está conformada por las medias oficiales de dichos parámetros, proporcionadas por el grupo de investigación, las cuales fueron utilizadas en los cálculos y en todo el proceso experimental. Los datos y la simulación se desarrollaron mediante el software SolidWorks, donde se analizó el comportamiento del flujo de aire. Además, se observó el comportamiento del viento al circular por diferentes secciones, con el propósito de optimizar el diseño y garantizar un flujo de aire estable y equilibrado. Por último, se aplicaron ecuaciones de la dinámica de fluidos, como gasto másico, caudal, continuidad y Bernoulli. La simulación dio como resultado configuraciones óptimas del túnel, con valores estables de 5,04 m/s y 45,66 m/s, sustentando su validez mediante la aplicación de ecuaciones, en las cuales los valores obtenidos se ajustaron notablemente a los simulados. Finalmente, se recomienda al grupo GEAA de la ESPOCH la implementación de túneles de viento cerrados, los cuales servirán para calibrar los equipos y reforzar investigaciones aerodinámicas en el futuro.

Palabras clave: Túnel de viento, análisis aerodinámico, simulación, SolidWorks, condiciones atmosféricas

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH); Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0005-5078-5453>.

ABSTRACT: The wind tunnel is a widely used instrument in recent years and is essential for aerodynamic analysis; however, its application in the educational system has been insufficient. For this reason, it is important to analyze a closed wind tunnel. The objective of this research is to simulate a closed wind tunnel using computational fluid dynamics (CFD), considering the environmental parameters of Riobamba, in order to assess its performance and effectiveness. The study employs a mixed-methods approach, utilizing analytical, synthetic, hypothetical, and deductive methods. The population consists of the environmental parameters of the city of Riobamba, provided by the GEAA group at ESPOCH, including altitude, temperature, atmospheric pressure, density, relative humidity, wind speed, and gravity. The sample comprises the official averages of these parameters, provided by the research group, which were used in the calculations and throughout the experimental process. The data and simulation were developed using SolidWorks software, where the airflow behavior was analyzed. Furthermore, the behavior of the wind as it flowed through different sections was observed, with the aim of optimizing the design and ensuring a stable and balanced airflow. Finally, fluid dynamics equations, such as mass flow rate, flow rate, continuity, and Bernoulli's equation, were applied. The simulation resulted in optimal tunnel configurations, with stable wind speeds of 5.04 m/s and 45.66 m/s. The validity of these configurations was supported by the application of equations, in which the obtained values closely matched the simulated values. Finally, the GEAA group at ESPOCH is recommended to implement enclosed wind tunnels, which will serve to calibrate equipment and strengthen aerodynamic research in the future.

Keywords: Wind tunnel, aerodynamic analysis, simulation, SolidWorks, atmospheric conditions

INTRODUCCIÓN

Construir objetos sin un previo análisis de cuál va a ser su respuesta con respecto a las condiciones físicas puede generar daños en los mismos, haciendo que se vuelvan obsoletos y generen una pérdida de recursos para la empresa. Analizar flujos turbulentos en objetos o en el interior de ellos se ha convertido en un estudio que va creciendo; con mayor exactitud nos ayuda a entender cómo se comportan los cambios físicos del ambiente en una sección específica (1).

Para comprender y analizar el comportamiento aerodinámico, es fundamental saber cómo se comporta el aire al momento de construir la mayoría de objetos mecánicos y cómo pueden verse afectados. Para ello, la simulación de los fenómenos físicos es fundamental, ya que permite determinar varios problemas y corregirlos a tiempo, obteniendo así un diseño más eficaz y óptimo.

Los túneles de viento son instrumentos que facilitan examinar la dinámica del aire a través de objetos sólidos, como automóviles, aviones o puentes, y determinar cómo pueden verse afectados por los diferentes flujos que prevalecen en la naturaleza. Este estudio es altamente

complejo, por lo que se puede continuar con investigaciones futuras sobre las simulaciones y la construcción de objetos físicos.

Dado el avance de la ciencia y la tecnología, comenzó a poner énfasis por estudiar los fluidos más complejos en tres temáticas muy fundamentales que son la física, los métodos numéricos y la informática. Varias investigaciones señalan que en las últimas dos décadas se estudiaron la dinámica de los gases, las ecuaciones de Navier-Stokes, la aerodinámica y, dentro de la matemática, el método de elementos finitos (2). Es por ello que, gracias a las mejoras de algoritmos y hardware, realizar simulaciones CFD permite optimizar costos y tiempo, ya que permite moldear de manera más eficiente un objeto en construcción.

Actualmente, se realizan numerosas simulaciones con la ayuda de diferentes softwares que utilizan la dinámica de fluidos computacional (CFD) para apreciar el comportamiento del aire al diseñar y evaluar diferentes perfiles aerodinámicos, como alas de aviones, palas de turbinas eólicas o carcasas de automóviles.

El estudio del comportamiento del aire es muy fundamental, ya que, de esta forma, podemos entender de mejor manera cómo va cambiando su entorno de acuerdo con los parámetros como la temperatura, la presión, la densidad y la velocidad en distintas condiciones atmosféricas. Por esta razón, es importante tener datos precisos y desarrollar análisis de forma más detallada mediante la dinámica de fluidos (CFD), en especial cuando trabajamos con un túnel modelado. También, la caracterización del flujo es primordial, ya que ayuda a identificar algunas áreas con turbulencia y, por consiguiente, evaluar la estabilidad del viento y cómo actúa en diferentes cuerpos sólidos.

En América Latina, en particular en Ecuador, la dinámica del viento no ha sido ampliamente analizada porque la principal fuente de energía proviene de las centrales hidroeléctricas. No obstante, raras veces se toman en cuenta las alteraciones climáticas y atmosféricas, razón por la cual hubo numerosos problemas con la producción de energía durante el año 2023. Según las estimaciones, en 2013 se produjo únicamente el 0,26 % de la energía eólica de todos los sistemas eléctricos del país (3).

En la actualidad, y específicamente en la ESPOCH, no existe un túnel de viento general que ayude a distintos usos didácticos o para fines netamente investigativos. Es por ello que es importante el empleo de CFD para generar exploraciones, ya sea en la construcción de objetos, mejorando y evaluando su funcionamiento aerodinámico, o analizando la velocidad del viento dentro de un túnel simulado. Incluso se pueden generar proyectos en la producción de electricidad. Dado los avances de la ingeniería industrial, es vital el uso de los distintos programas computacionales existentes en el mercado para realizar dichas simulaciones (4).

Mediante el uso de un enfoque físico y teórico, se estudian las principales ecuaciones de la dinámica de fluidos, como el gasto másico, el caudal, el principio de continuidad y la ecuación de Bernoulli, con el propósito de analizar el tipo de flujo que se plantea, y en particular en la zona de prueba. Asimismo, la investigación se centra en el análisis del viento usando las

ecuaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), enfocando posibles problemas derivados al interactuar con flujos turbulentos (5).

El objetivo principal de este trabajo es dimensionar un túnel de viento cerrado mediante una herramienta experimental como SolidWorks, examinando las áreas de las zonas de prueba, los conos de contracción y las boquillas de descarga. Asimismo, se tiene en cuenta el uso de un ventilador y deflectores, que en el futuro servirán como base de estudio de temas relacionados directamente con la dinámica de fluidos en la carrera de Física, y de gran utilidad tanto para la industria como para la ingeniería.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación tiene un enfoque metodológico bien estructurado y fácil de realizar, diseñada específicamente para llevar a cabo la simulación del viento con una base de datos que asegura su validez aplicada en la simulación del túnel de viento. Para realizar este proceso, se dispuso de una recopilación de datos de los parámetros ambientales, la configuración de un modelo computacional y, finalmente, se verificó resultados a través de principios teóricos de la dinámica de fluidos. Esta estructura metodológica garantiza precisión y coherencia en cada etapa de los análisis experimentales.

Tipo de investigación

La investigación adopta un enfoque mixto que combina tanto aspectos cualitativos como cuantitativos. En la parte cualitativa, se recopilaron datos de libros de física, artículos científicos y documentación técnica de diversos programas informáticos. Esto ayudó a ampliar la información necesaria para realizar simulaciones del túnel de viento bajo diferentes condiciones ambientales. Se realizaron cálculos utilizando ecuaciones de dinámica de fluidos y se analizaron los resultados de las simulaciones CFD, siguiendo un enfoque cuantitativo. Además, se estudió el comportamiento de variables como la temperatura, la presión atmosférica, la humedad relativa, la velocidad del viento y, por último, el número de Mach. También aplicaremos el método hipotético-deductivo, que se basa en una hipótesis previa y en un análisis experimental. Este último permitirá contrastar la validez del modelo físico-teórico con los resultados obtenidos en la simulación por computadora.

Población y muestra

La población de esta investigación está fundamentada en los parámetros ambientales de la ciudad de Riobamba, otorgados por el grupo GEAA de la ESPOCH. Los datos son primordiales para realizar las ecuaciones de dinámica de fluidos, ya que nos permiten obtener resultados precisos de la presión, densidad y velocidad de flujo. Estos valores ayudan en la simulación del comportamiento del aire dentro del túnel de viento cerrado; esta información es importante, ya que puede establecer un contorno real en el modelo computacional, lo cual garantiza que los resultados sean factibles en el entorno físico donde se plantea implementar el túnel de viento. Con esto, se busca que el diseño pueda construirse y evaluar sus condiciones reales,

manteniendo un buen desempeño aerodinámico. La población de referencia es importante para lograr los objetivos mediante la precisión en la caracterización del flujo y su confiabilidad en las simulaciones ejecutadas mediante la simulación CFD.

Entorno, mediciones y análisis

Esta investigación se realizó en la escuela politécnica de Chimborazo (EsPOCH) ubicada en la ciudad de Riobamba, Ecuador, en el área de facultad de ciencias. El objetivo principal es incorporar la dinámica de fluidos computacionales (CFD) como un instrumento de estudio científico. Posterior a ello, se busca desarrollar un túnel de viento cerrado, a través del uso de (CFD) para analizar el comportamiento del aire y los fenómenos aerodinámicos sin tener que utilizar prototipos que generan gastos.

Para realizar la simulación se necesitaron los parámetros reales de Riobamba, los cuales fueron proporcionados por el grupo GEAA de la ESPOCH, como altitud, temperatura, presión y velocidad del viento. Los datos se aplicaron en las ecuaciones de dinámica de fluidos para representar con precisión el comportamiento del aire en el túnel de viento. Como resultado, se consideraron condiciones iniciales de 2754 msnm de altitud y 13 °C de temperatura promedio; esto permitió calcular de manera adecuada una densidad de 0,881 kg/m³, es decir, mantiene coherencia con el entorno físico para implementar el diseño.

En cuanto al análisis, se centra en observar cómo se comporta el aire dentro del túnel aplicando las simulaciones realizadas en SolidWorks. Por esta razón, se estudian variables como la velocidad, la presión del aire y la temperatura en distintas partes del túnel. Se demostró que el flujo se mantenía estable y con un régimen subsónico, con una velocidad de 37 m/s en la zona de prueba pequeña; en cambio, en la zona grande, mantenía una velocidad de 4,22 m/s. También se confirma los valores de Reynolds, donde el flujo era turbulento, por lo que es adecuado en estos estudios. Por ello, la simulación es confiable y realista.

RESULTADOS

1. Análisis de los parámetros ambientales de la ciudad de Riobamba.

Para establecer y examinar los parámetros ambientales, es necesario utilizar la simulación para obtener los datos de presión y de temperatura media en dicho punto, los cuales corresponden a 2 754 msnm y 13 °C (286,5 K).

2. Densidad del aire

$$p = \frac{P}{R * T}$$

$$P = 0,881 \frac{kg}{m^3}$$

A partir de la ecuación general de los gases, se obtiene una densidad de aire de $0,881 \text{ kg/m}^3$, lo que muestran las condiciones examinadas y, por ende, da como resultado una densidad menor que la correspondiente al nivel del mar.

3. Velocidad del diseño

El valor es necesario dentro del diseño del túnel, ya que, a la velocidad máxima que posee el viento producido por un ventilador, estos datos se calculan mediante la siguiente ecuación, la cual gobierna una máquina eólica presentada en el eje horizontal (6).

$$v = \sqrt[3]{\frac{2 * p_{elec}}{\pi * \rho * r^2 * C_p * \eta g}}$$

$$v = 19,94 \frac{m}{s}$$

En la ecuación desarrollada se determinó una velocidad de diseño de $19,94 \frac{m}{s}$, la cual corresponde a la rapidez del aire necesaria para que un ventilador trabaje con una potencia de 225W bajo las condiciones ambientales determinadas.

4. Número de Mach

Para la obtención del número de Mach, se emplea con la velocidad del sonido a 13°C ($286,15 \text{ K}$), mediante la ecuación.

$$c = 331 \frac{m}{s} * \sqrt{\frac{T}{273,15K}}$$

$$c = 338,79 \frac{m}{s}$$

En el cálculo desarrollado de velocidad de sonido, del cual dio como resultado $338,79 \frac{m}{s}$ procedemos aplicar la ecuación para determinar el número de Mach.

$$Ma = \frac{v}{c}$$

$$Ma = 0,06$$

Mediante la ecuación de número de Mach, se obtuvo como resultado 0,06 lo que quiere decir que el flujo del aire se mueve mucho más lento que el sonido. Sin embargo, al utilizar los factores ambientales de Riobamba, los cuales fueron obtenidos previamente, involucra tener

muy en cuenta el diseño y la configuración del túnel de viento cerrado al instante de modelarlo en el software.

5. Selección del propulsor

Para facilitar la simulación se empleó el ventilador comercial HEPT-45-6M/H, dado que sus parámetros se adecúan perfectamente a las circunstancias de un túnel de viento para investigación (7). Las principales características del mismo se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales propiedades y desempeño del ventilador seleccionado.

Ventilador Axial (HEPT-45-6M/H)	
HEPT	Ventilador helicoidal tubular
Diámetro (cm)	45
Número de aspas	6
Instalación	Monofásico (M)
Caudal	Alto (H)
Caudal máximo de aire (m ³ /h)	4900
Velocidad (rpm)	955
Potencia de entrada (w)	225
Nivel de presión sonora (db(A))	56
Peso (Kg)	15,5
Velocidad angular (rpm y rad/s)	955 y 100,01

Fuente: Mera, 2024.

6. Dimensiones del túnel de viento cerrado

En este apartado se describe la dimensionalización correspondiente al diseño y la modelación en 3D de un túnel de viento de circuito cerrado, en las cuales existen dos secciones de prueba, especificando cada pieza, mediante el uso computacional SolidWorks.

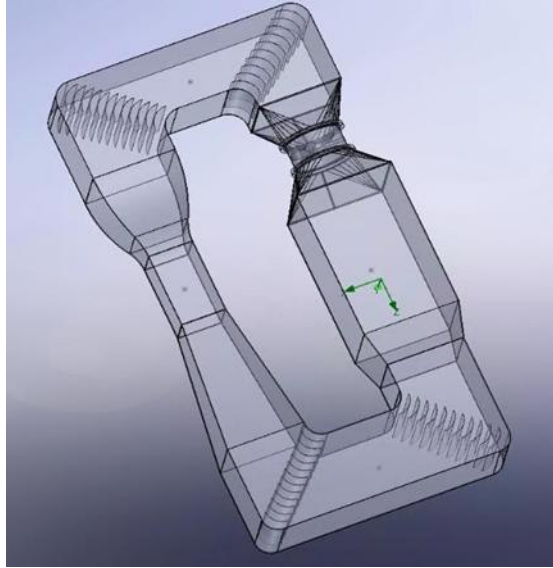


Figura 1. Diseño 3D del túnel de viento cerrado.

En la Figura 1 se creó un túnel mediante SolidWorks, añadiendo deflectores; de esta forma, se asegura un flujo de aire más estable. Las dimensiones son diseñadas para instalarlo en un laboratorio y la estructura que posee es de acero negro, por lo que garantiza su duración y también su resistencia.

7. Deflector

Uno de los elementos fundamentales para optimizar la eficacia del flujo de aire son los deflectores proyectados en cada esquina del túnel de viento. Se han creado 45 deflectores, 10 fueron situados a su salida del flujo, 12 en cada esquina donde se requieran mantener la velocidad uniforme y 11 en la otra esquina restante (8).

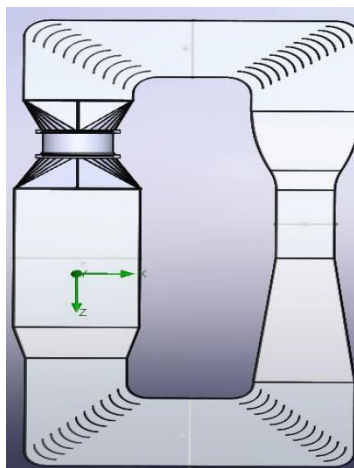


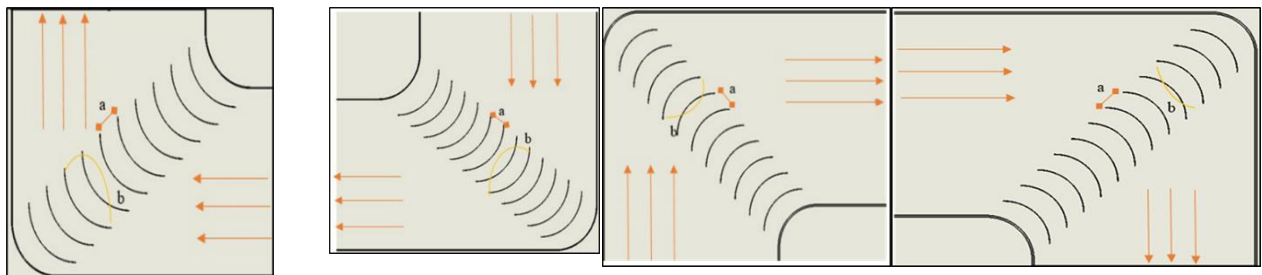
Figura 2. Deflectores (Solid line: 91L198).

En la Figura 2 muestra los deflectores en las esquinas del túnel de viento donde deben seguir algunas reglas para que sean más competentes en el lugar donde les corresponde, teniendo una cobertura de 90° y su radio debe ser mayor a 15,2 cm, entre cada deflector con una distancia de 7,6 cm.

En la tabla 2 se detallan las curvaturas y la disposición de los reflectores ubicados en las 4 esquinas del túnel de viento.

Tabla 2. Curvatura y espaciado de reflectores.

Parte inferior izquierda	Parte inferior derecha	Parte superior izquierda	Parte superior derecha
<p>La curvatura de la esquina cuenta con un radio de 29,82 cm, el intervalo de espacio de cada deflector es de $a=15,00$ cm, permitiendo ubicar 10 deflectores. Por lo que la distancia entre cada uno de sus extremos es de $b=44,51$ cm, por lo que la relación entre $b/a=2,97$.</p>	<p>Se determino un radio de 25 cm, y se situaron 12 deflectores con una separación entre cada uno de $a=12$ cm. Obteniendo un valor donde $b=30,04$ cm, lo que permitió establecer la relación entre $b/a= 2,50$.</p>	<p>La superior izquierda la curvatura tiene un radio de 29,80 cm, donde se ha elegido 11 deflectores, los que están ubicados a una distancia de $a=14$ cm entre cada uno. Alcanzando un valor de sus extremos de $b=36,77$ cm, por lo tanto, la relación entre $b/a=2,63$.</p>	<p>Se colocaron 12 deflectores, separados entre sí por una distancia de $a=15$ cm, en la curvatura del extremo superior derecho, que tiene un radio de 25 cm. El valor de sus extremos es $b=35,36$ cm, lo que significa que la relación b/a es 2,36.</p>



Fuente: Mera, 2024.

7. Mallado del túnel de viento

Para este trabajo se utilizó el mallado manual de la Figura 3, con el objetivo de tener un control más exacto sobre su densidad y la calidad que este puede ofrecer, sobre todo en áreas que son complicadas de estudiar.

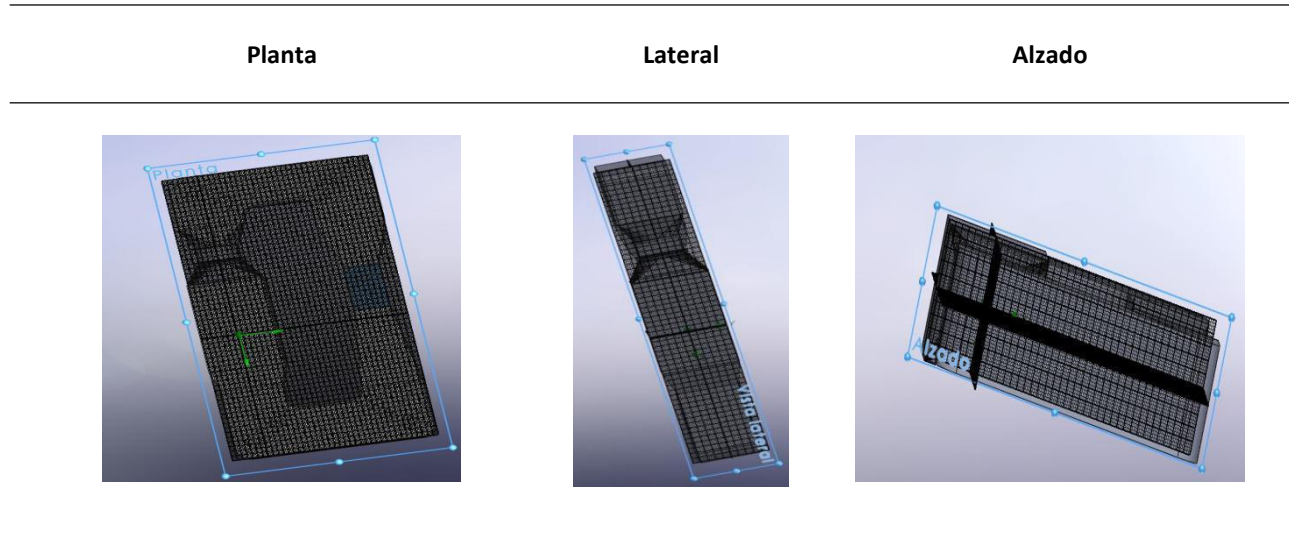


Figura 3. Esquema del mallado en vistas: planta, lateral y alzado.

La Figura 3 muestra el mallado manual en diferentes planos; en cada uno se aprecia cómo la malla se adapta a la geometría, manteniendo un control más adecuado en cuanto a la densidad y la calidad del mallado, especialmente en las zonas más complicadas, para obtener resultados más precisos en la simulación.

8. Presión total

Una de las condiciones de contorno aprovechadas corresponde a la presión total del flujo en la zona frente al rotor, la cual en la presión atmosférica de Riobamba (72.324,96 Pa). Mediante el uso de la opción en el software lo que permitió definir esta presión como un total, formando una presión manométrica cero. Como lo muestra Mejías (9).

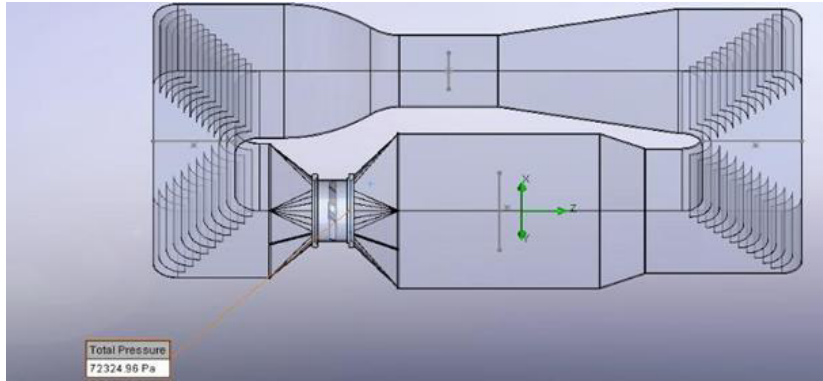


Figura 4. Presión total, 72324,96 Pa, en la otra cara del rotor.

La Figura 4 muestra un modelo de túnel de viento donde se va distribuyendo la presión total alrededor de un rotor. Las líneas que se disponen en todos los lados representan las superficies de presión (contornos), donde claramente se muestra cómo el flujo se comporta al entrar, al atravesar y también al salir.

Tabla 3. Resumen de resultados simulados para la zona de prueba pequeña (1).

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]	Convergencia
PG Density (Fluid) 5	[kg/m ³]	0.492	0.482	0.476	0.492	100	Si
PG Mach Number 7	[]	0.121	0.117	0.113	0.124	100	Si
PG Relative Humidity 4	[%]	100.000	92.098	80.559	100.000	100	Si
PG Static Pressure 1	[Pa]	38423.446	38325.624	38230.896	38423.446	100	Si
PG Temperature (Fluid) 3	[K]	271.293	275.544	271.293	278.094	100	Si
PG Total Pressure 2	[Pa]	38736.651	38658.781	38576.693	38736.651	100	Si
PG Velocity 6	[m/s]	36.719	37.556	36.719	38.075	100	Si

Fuente: Mera, 2024.

La Tabla 3 muestra valores de simulaciones que se evidencian en la zona de prueba pequeña, de varias magnitudes relacionadas con el fluido y cómo estas se mantienen estables, con una alta uniformidad entre todos los valores mínimos y máximos de cada variable analizada. El número de Mach indica un régimen subsónico; en cambio, la velocidad del fluido se conserva en 37 m/s sin cambios importantes. Además, la presión y la temperatura demuestran agua levemente presurizada y fría, lo que evidencia la densidad obtenida. También se puede ver que la humedad relativa es elevada, lo que puede beneficiar procesos de condensación en el sistema. Todas las variables lograron un 100 % de progreso y convergencia, reafirmando la validez y estabilidad numérica de la simulación.

Tabla 4. Resumen de resultados simulados para la zona de prueba grande.

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]	Convergencia
PG Density (Fluid) 12	[kg/m ³]	0.847	0.836	0.832	0.847	100	Si
PG Mach Number 14	[]	0.013	0.014	0.013	0.014	100	Si
PG Relative Humidity 11	[%]	100.000	100.000	100.000	100.000	100	Si
PG Static Pressure 8	[Pa]	68051.27	68046.926	68028.948	68084.547	100	Si
PG Temperature (Fluid)10	[K]	279.248	281.899	279.248	283.053	100	Si
PG Total Pressure 9	[Pa]	68058.17	68053.895	68035.936	68091.543	100	Si
PG Velocity 13	[m/s]	4.171	4.225	4.171	4.254	100	Si

Fuente: Mera, 2024.

Los resultados de la Tabla 4 muestran un flujo con comportamiento estable y uniforme, con régimen subsónico y condiciones prudentemente presurizadas. Cabe recalcar que presenta una alta humedad y baja temperatura, lo que demuestra un flujo frío y regulado, mientras que la convergencia total indica exactitud y firmeza de la simulación.

Tabla 5. Resumen de resultados simulados para la cabecera.

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]	Convergencia
PG Density (Fluid) 19	[kg/m ³]	0.323	0.313	0.308	0.323	100	Si
PG Mach Number 21	[]	0.070	0.067	0.065	0.071	100	Si
PG Relative Humidity 18	[%]	100.000	76.421	58.089	100.000	100	Si
PG Static Pressure 15	[Pa]	24684.871	24658.199	24639.359	24684.871	100	Si
PG Temperature (Fluid)17	[K]	265.898	272.796	265.898	276.499	100	Si
PG Total Pressure 16	[Pa]	24752.113	24730.630	24714.259	24752.113	100	Si
PG Velocity 20	[m/s]	20.872	21.543	20.872	21.881	100	Si

Fuente: Mera, 2024.

En la Tabla 5 nos indica un flujo constante y uniforme, que mantiene un régimen subsónico (Mach 0,07) con una velocidad de 21,54 m/s. En cuanto a la presión y su temperatura, evidencian un flujo más frío, con una baja densidad (0,313 kg/m³), mientras que la humedad varía en un 100%, lo que establece una zona de saturación. Todo esto demuestra la validez de la simulación.

Tabla 6. Resumen de resultados simulados para la base.

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]	Convergencia
PG Density (Fluid) 26	[kg/m ³]	0.746	0.734	0.727	0.746	100	Si
PG Mach Number 28	[]	0.023	0.023	0.022	0.023	100	Si
PG Relative Humidity 25	[%]	100.000	99.280	94.400	100.000	100	Si

PG Static Pressure 22	[Pa]	59452.461	59418.959	59349.705	59452.461	100	Si
PG Temperature (Fluid)24	[K]	276.903	280.505	276.903	282.201	100	Si
PG Total Pressure 23	[Pa]	59470.272	59437.273	59369.278	59470.272	100	Si
PG Velocity 27	[m/s]	7.134	7.264	7.134	7.335	100	Si

Fuente: Mera, 2024.

Los resultados de la tabla 6 muestra un flujo constante y uniforme, con régimen subsónico (Mach 0,023) y una velocidad media de 7,26 m/s. La densidad del fluido (0,734 kg/m³) y la presión estática (≈59.419 Pa) indican un flujo moderadamente presurizado y frío, con una temperatura promedio de 280,5 K. Una humedad relativa cercana al 100% lo que resulta que tiene condiciones casi saturadas. Todas las variables alcanzaron el 100% de correlación, lo que se deduce la estabilidad numérica del modelo.

9. Estudio del tipo de flujo de acuerdo al número de Reynolds en la zona de prueba

Al tener un conducto que no es circular se utiliza la ecuación del diámetro hidráulico para la primera tubería de la zona de prueba pequeña.

$$D = \frac{4A}{P}$$

$$D = \frac{4 * (0,49m^2)}{2,8} = 0.7m$$

A partir de la ecuación desarrollada se puede determinar el diámetro hidráulico de la sección de prueba, obteniendo un valor de 0,7 m. Con esta base, el área de la sección transversal es de 0,49 m² y el perímetro de 2,8 m, confirmando la geometría cuadrada y simétrica del conducto.

Para realizar la siguiente ecuación calculando así el número de Reynolds en la zona de prueba pequeña.

$$Re = \frac{Pv. central. D}{u}$$

$$Re = 1573629,26$$

10. Estudio que se basa en el tipo de flujo según el número de Reynolds en la zona de prueba

En la segunda ecuación se observa la tubería de la zona de prueba grande, en la cual se cuenta con un conducto de forma no circular, por lo que se utiliza la ecuación para el cálculo del diámetro hidráulico.

$$D = \frac{4A}{P}$$

$$D = \frac{4 * (2,25 \text{ m}^2)}{6\text{m}} = 150\text{m}$$

Finalmente utilizamos la siguiente ecuación para realizar el cálculo del número de Reynolds en la segunda zona de prueba.

$$Re = \frac{p.v \text{ central}. D}{u}$$

$$Re = 372211,91$$

Los números $Re = 1573629.26$ y $Re = 372211.91$ calculados según los centros de velocidad de las áreas de prueba pequeña y grande, respectivamente, permiten identificar que se trata de un flujo turbulento y no laminar, ya que estos valores exceden (201 4080). (10). Esto permite realizar análisis de los modelos aerodinámicos en dos secciones de prueba del túnel de viento.

DISCUSIÓN

Los resultados alcanzados durante la simulación del túnel de viento cerrado arrojan que es un procedimiento aerodinámico constante, con un flujo predominante subsónico, consistente con las condiciones atmosféricas de la ciudad de Riobamba. También cabe recalcar que existen mínimas variaciones en presión, densidad y temperatura, por la razón que confirma la correcta proporción del modelo CFD, en relación con (11) y (12), quienes resaltan que la validación numérica y experimental es fundamental para lograr con exactitud los análisis en túnel de viento.

También, en la zona de prueba pequeña, se confirmó una velocidad que tenía un promedio de 37 m/s y un número de Mach de 0,121; esto nos muestra un flujo subsónico, frío y ligeramente presurizado. Este procedimiento también coincide con lo analizado por (13), quien menciona que la calidad del flujo en la zona influye directamente en la precisión aerodinámica.

En cambio, en la zona de prueba grande, la velocidad media fue de 4,22 m/s, con un número de Mach de 0,014. A pesar de la menor velocidad, el flujo se conservó estable y uniforme, dando

como resultado lo consistente con los aciertos de (14), quien demostró que las variaciones de velocidad y presión dependen claramente de la potencia del ventilador y las dimensiones del sistema. En este caso, el funcionamiento del ventilador a plena capacidad explica los altos valores del número de Reynolds.

En la entrada del túnel, la velocidad promedio de 21,54 m/s y la densidad de 0,313 kg/m³ indican un flujo subsónico, con una humedad relativa que alcanza el 100 %, lo que muestra la posible presencia de zonas de saturación de aire. Según (13), las fluctuaciones de presión y humedad pueden perturbar la persistencia del flujo; sin embargo, el diseño efectuado mantuvo la similitud y la fijeza numérica.

En la salida del túnel, los resultados confirmaron un flujo subsónico, con una velocidad promedio de 7,26 m/s y un número de Mach de 0,023. Las condiciones de presión y temperatura fueron estables, mientras que la humedad se mantuvo cercana al 100 %, lo que garantiza la precisión del modelo. Esto concuerda con el trabajo de (15) y (17), quienes expusieron la importancia de generar situaciones de contorno registradas para validar así las simulaciones CFD. Los resultados de las ecuaciones por el lado de Reynolds ($Re = 1\ 573\ 629,26$ y $Re = 372\ 211,91$) destacan significativamente el límite de 4000 determinado por (16), lo que corrobora un régimen turbulento, importante para los análisis aerodinámicos más sensatos. Asimismo, la estabilidad de la velocidad a lo largo del eje X ratifica la eficacia del diseño y la precisión del modelo.

También, con los estudios (18), (19) y (20), este trabajo representa un avance significativo, ya que integra un modelado tridimensional, con ayuda de la simulación numérica y el análisis físico en condiciones locales. En consecuencia, los resultados explican que aplicar CFD como herramienta permite una reproducción precisa del comportamiento del flujo e instaura una base sólida para futuros proyectos de energía eólica y diseño aerodinámico en la ESPOCH.

CONCLUSIONES

El análisis de un túnel de viento cerrado mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) y tomando en cuenta las condiciones reales de la ciudad de Riobamba, como la altitud, presión y densidad, permite determinar con precisión el comportamiento del aire dentro de la estructura. Los resultados son válidos, porque demuestran que la simulación del túnel y las ecuaciones de fluidos son herramientas útiles en el estudio aerodinámico en entornos controlados; asimismo, la optimización de recursos experimentales ayuda a reducir el uso de equipos físicos que suelen ser costosos; de esta manera, se contribuye al aprendizaje de forma más eficaz y práctica.

El estudio tiene un enfoque experimental y mixto, y se emplearon métodos analítico, sintético, hipotético y deductivo. Además, se analizó el comportamiento del viento al circular por diferentes secciones del túnel, con el propósito de que el diseño sea mejor para que el aire se mueva de forma estable y equilibrada. Por último, se aplicaron ecuaciones de la dinámica de fluidos como gasto másico, caudal, continuidad y Bernoulli; de este modo, se validan de forma teórica los resultados que arrojaron mediante la aplicación SolidWorks.

La simulación dio como resultado, de manera exacta, las configuraciones óptimas del túnel, las cuales alcanzaron valores estables de 5,04 m/s y 45,66 m/s, sustentando así su validez con la aplicación de ecuaciones físicas (gasto másico, caudal, principio de continuidad y Bernoulli) de forma teórica, en donde los valores obtenidos se ajustaron notablemente a los simulados. Finalmente, se recomienda al grupo GEAA de la ESPOCH la implementación de túneles de viento cerrados, los cuales servirán para calibrar los equipos y reforzar investigaciones aerodinámicas en el futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. METAS. Presión atmosférica, presión barométrica y altitud. Conceptos y aplicaciones. Jalisco–México: Zapotlán El Grande, 2005. Disponible en: <http://www.metas.com.mx/guiamet/la-Guia-MetAs-05-02-presion-atmosferica.pdf>
2. MONGE, G. “Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad”. Revista Ingeniería, 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/ring.v16i2.665>
3. MONJE, J. Estudio matemático del comportamiento de un fluido incompresible en flujo laminar. Madrid, España. 2015. Disponible en: <http://oa.upm.es/38373/>
4. MORA, X. “Las ecuaciones de Navier-Stokes”. *Mètode Science Studies Journal*, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.7203/metode.8.9415>
5. Quinatoa, C. Repotenciación y optimización del túnel de viento del laboratorio de aerodinámica de la carrera de ingeniería automotriz. ESPOCH, 2020. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15290/1/65T00353.pdf>
6. QUISPE, C. “Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades”. *Revista de Investigación de Física*, 2014. Disponible en: <https://doi.org/10.15381/rif.v17i01.8664>
7. RUIZ, H.; & CURICAMA, A. Diseño y construcción de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en vehículos. ESPOCH, 2013. Disponible en: <https://books.google.com/books?id=hIzAQAAMAAJ>
8. Salvador, J. Análisis aerodinámico regional mediante técnicas CFD de un semirremolque tipo plataforma. Universidad SEK, 2018. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2881/2/Tesis%20Juan%20Carlos%20Salvador>
9. SODECA. Ventiladores helicoidales y extractores de tejado. Madrid, España: 2019. Disponible en: https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT07_Helicoidales_Tejado_2019_ES.pdf
10. SOLÍS, R. Diseño y construcción de un túnel de viento para evaluar el funcionamiento de un rotor eólico instructivo. ESPOCH, 2016. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5184>
11. VÁZQUEZ, J. “La ecuación de Navier-Stokes: Un reto físico-matemático para el siglo XXI”. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 2004. Disponible en: <http://www.unizar.es/acz/05Publicaciones/Monografias/Monografia26/031Vazquez.pdf>

12. CALAUTIT, J.; & HUGHES, B. "CFD and experimental data of closed-loop wind tunnel flow". Data in Brief, 2016. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2016.02.033>
13. DAO, Ha; et al. "Wind tunnel and CFD studies of wind loadings on topsides of offshore structures". Ocean Engineering, 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823016943>
14. ADRIÁN, Oscar; et al. "Caracterización del túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC". Vehicle System Dynamics, 2018. Disponible en: https://ingenierias.uanl.mx/anteriores/80/documentos/A21_N80_caracterizacion_del_tunel.pdf
15. FRANCO, D.; & RAMÍREZ, P. "Construcción de un túnel de viento". Revista de Innovación Sistemática, 2017. Disponible en: https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Innovacion_Sistematica/vol1num1/Revista_de_Innovacion_Sistematica_V1_N1_6.pdf
16. IMADUDDIN, B.; & NOFRIZALIDRIS, D. "Comparison between SolidWorks and Ansys Flow Simulation on Aerodynamic Studies". Journal of Industry, Engineering and Innovation, 2019. Disponible en: <https://jdse.fazpublishing.com/index.php/jdse/article/download/19/19/>
17. ENRIQUE, P.; MERA, L.; & TAYUPANTA, G. Diseño y construcción de un túnel de viento a escala. USFQ, 2016. Disponible en: <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/handle/23000/5938>
18. GONZÁLES, A. "Historia de la dinámica de fluidos computacionales (CFD)". Instituto Politécnico Nacional, 2018. Disponible en: https://www.academia.edu/39320819/Historia_del_CFD
19. HU, X.; et al. "The low frequency pressure pulsation and control of the open-jet wind tunnel". Scientific Reports, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22080-9>
20. VERMA, N.; & BALONI, D. "Numerical and experimental investigation of flow in an open-type subsonic wind tunnel". SN Applied Sciences, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1422-3>