

Simulación de Parámetros Operativos de Ventilador Minero para Aplicaciones en Mantenimiento Predictivo Basado en Machine Learning

Diego Concha Araya Prof. Michael Miranda S.

Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Santiago de Chile

15 de Mayo, 2024



DEPARTAMENTO DE
**INGENIERÍA
MECÁNICA**



Contexto y motivación

- La ventilación subterránea es crítica para la **seguridad y eficiencia** operativa en minería.
- Los planes de mantenimiento tradicionales no siempre reflejan el **estado real de los ventiladores**.
- Se plantea **correlacionar mediciones experimentales con simulaciones CFD** para habilitar **mantenimiento predictivo**.





Objetivo general

*Diseñar e implementar un **modelo a escala de un túnel de viento** con analogía a sistemas de ventilación minera, con **instrumentación y control basados en Arduino**, a fin de evaluar y correlacionar datos de operación con un modelo de **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)** para el desarrollo de estrategias de **mantenimiento predictivo**.*





Objetivos específicos

1. Construir el prototipo e integrar la instrumentación.
2. Desarrollar y calibrar el modelo CFD.
3. Comparar resultados simulados con datos experimentales.
4. Proponer lineamientos de mantenimiento predictivo.





Flujo de trabajo general

1. Diseño y construcción del túnel de viento.
2. Instrumentación (corriente, voltaje, temperatura, vibración, flujo).
3. Diseño de interfaz de control y manejo de datos.
4. Modelo CFD en *ANSYS Fluent*.
5. Validación y ajuste.
6. Lineamientos mantenimiento predictivo.



Túnel de viento a escala



- Ventilador axial 120 mm regulado por PWM (0–4500 RPM).
- Sección circular de 94mm de diámetro y 480mm de largo.
- Diseño de cámara suspendida mediante resortes.

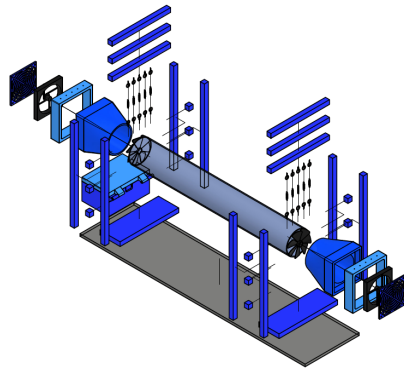


Figura 1: Vista explosionada del modelo CAD del dispositivo experimental.

Instrumentación

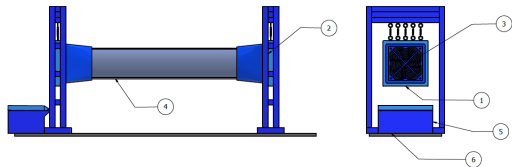


Figura 2: Esquema de disposición de los sensores.

Parámetros monitorizados

Corriente, voltaje, temperatura del motor, vibración radial, velocidad del flujo de aire.

1. Sensor de Corriente ACS712.
2. Sensor de Voltaje PWM (0-25 V).
3. Sensor de Temperatura LM35.
4. Cámara Térmica AMG8833.
5. Acelerómetro MPU6050.
6. Sensor de Flujo de Aire Indirecto (Anemómetro Calibrado).

Los sensores se conectan a una placa de desarrollo ESP32.



Obtención de datos

- Microcontrolador Arduino con servicio REST API.
- Control de velocidad del ventilador y muestreo de datos.
- Datos graficados en vivo y almacenados en la base de datos.

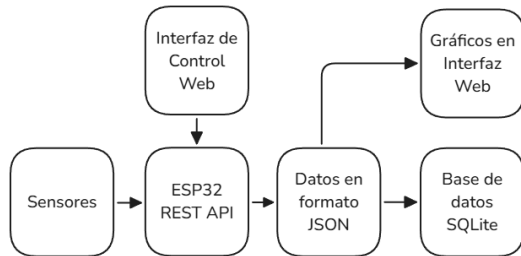


Figura 3: Esquema de obtención de datos.





Interfaz de control

The image shows a web-based control interface for the FAS Ventilator Prototype. At the top is the FAS logo and the text 'FAS Ventilator Prototype'. Below this, there are input fields for 'Controller IP Address' (192.168.0.16) and 'Fan RPM IP Address' (192.168.0.17). A 'Select Sensors' section includes checkboxes for Vibration (checked), Fan RPM, Camera, Current, Temperature, Voltage, and Outflow. An 'Update Interval (ms)' field is set to 100. A 'Fan Speed' slider is positioned at 79%. At the bottom are three buttons: 'Start', 'Stop', and 'Charts'.

Figura 4: Panel de control del dispositivo experimental.



- Permite el control y monitoreo del dispositivo.
- Almacena los datos de sensores y condiciones de operación.

	A.Z id	A.Z timestamp	A.Z sensor	A.Z values
22784	151.114	2023-01-17 11:50:45.957	fanrpm	["value":1566.667]
22785	151.113	2023-01-17 11:50:45.952	outflow	["value":1.681319]
22786	151.112	2023-01-17 11:50:45.940	fanrpm	["value":1575]
22787	151.111	2023-01-17 11:50:45.935	outflow	["value":1.472528]
22788	151.110	2023-01-17 11:50:45.932	fanrpm	["value":2307.692]
22789	151.109	2023-01-17 11:50:45.917	outflow	["value":1.1753258]
22790	151.108	2023-01-17 11:50:45.905	fanrpm	["value":2307.692]
22791	151.107	2023-01-17 11:50:45.900	outflow	["value":1.688645]
22792	151.106	2023-01-17 11:50:45.887	fanrpm	["value":1071.429]
22793	151.105	2023-01-17 11:50:45.882	outflow	["value":1.641026]
22794	151.104	2023-01-17 11:50:45.872	fanrpm	["value":1363.636]
22795	151.103	2023-01-17 11:50:45.866	outflow	["value":1.1786325]
22796	151.102	2023-01-17 11:50:45.856	fanrpm	["value":1363.636]
22797	151.101	2023-01-17 11:50:45.851	outflow	["value":1.688645]
22798	151.100	2023-01-17 11:50:45.843	fanrpm	["value":1200]
22799	151.099	2023-01-17 11:50:45.836	outflow	["value":1.818071]
22800	151.098	2023-01-17 11:50:45.829	fanrpm	["value":1200]
22801	151.097	2023-01-17 11:50:44.967	outflow	["value":1.687424]

Figura 5: Ejemplo de tabla de datos de sensores.





Preparación del Modelo CAD



- Modelo simplificado del volumen de control con regiones delimitadas.

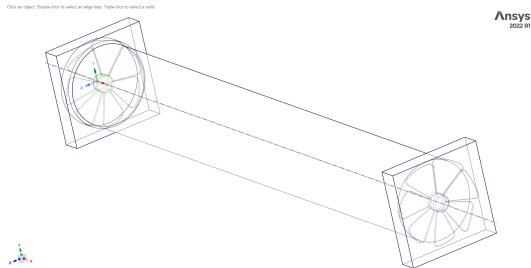


Figura 6: Geometría del modelo en ANSYS SpaceClaim.

Mallado del modelo



- Malla de hexahedros y tetraedros.
- Refinamiento por zonas.

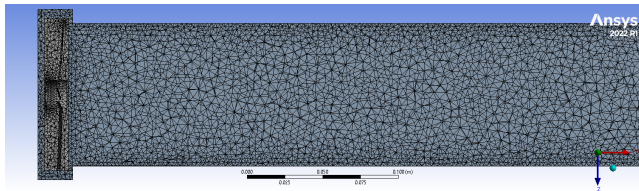


Figura 7: Mallado realizado en ANSYS Mesher.



Configuración del modelo CFD

Ansys

FLUENT

- Algoritmo SIMPLE para flujo incompresible.
- Modelo de turbulencia $k - \epsilon$.
- Condiciones de contorno de entradas o salida de presión.
- Velocidades fijas de rotación del ventilador.
- Aire como fluido ideal:
 - Densidad 1.225 kg/m^3
 - Viscosidad de $1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

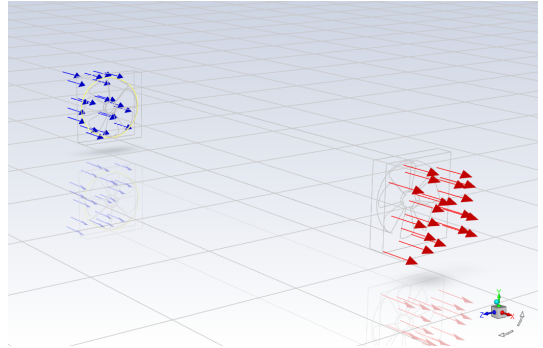


Figura 8: Condiciones de borde aplicadas en ANSYS Fluent.



Estrategia de validación

1. Ejecutar simulaciones estacionarias a 833, 2500 y 4200 RPM.
2. Medir velocidad media a la salida del dispositivo.
3. Calcular error porcentual relativo ϵ .

Se evalúa el error promedio y la correlación entre el modelo CFD y el modelo experimental construido.

Error porcentual relativo

$$\epsilon = \frac{|U_{exp} - U_{sim}|}{U_{exp}} \times 100 \%$$





Comparación velocidad del flujo

RPM	U_{exp} (m/s)	U_{sim} (m/s)	Error (%)
833	0.63	0.46	26.98
2500	1.80	1.34	25.56
4200	2.75	2.12	22.91

Tabla 1: Comparación de velocidades promedio medidas y simuladas a diferentes RPM del ventilador.



Cálculo y convergencia

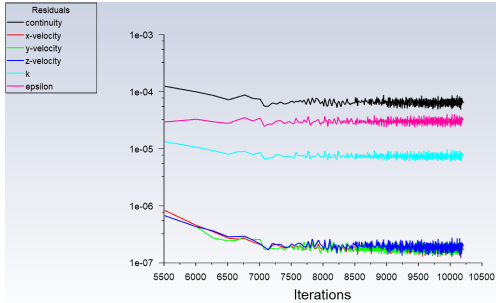


Figura 9: Gráfico de convergencia para 833 RPM.

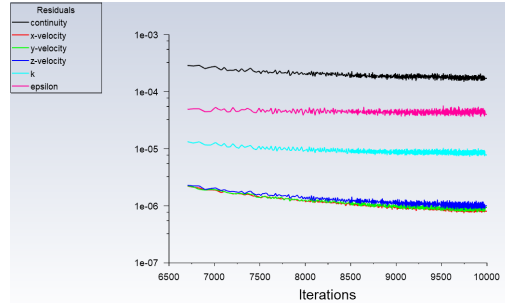


Figura 10: Gráfico de convergencia para 4200 RPM.

Distribución de velocidades (4200 RPM)

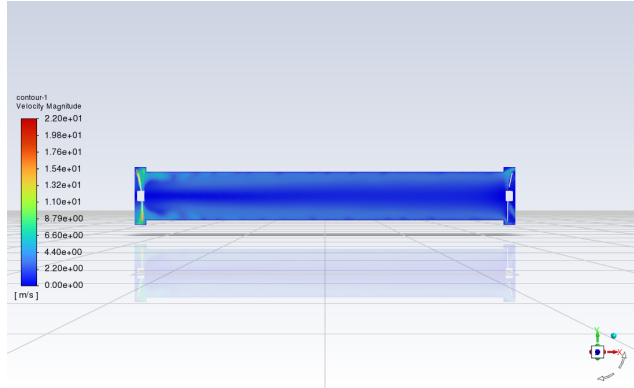


Figura 11: Contornos de velocidad simulados (m/s) en el plano central del túnel para 4200 RPM.

Presiones estáticas y dinámicas

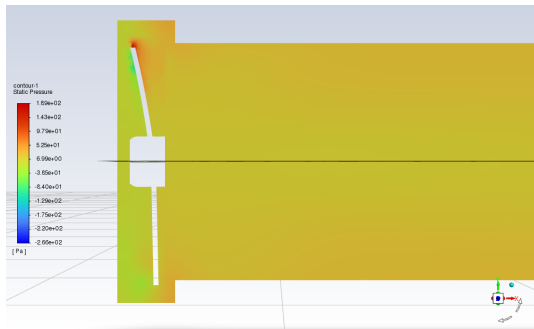


Figura 12: Presión estática para 4200 RPM.

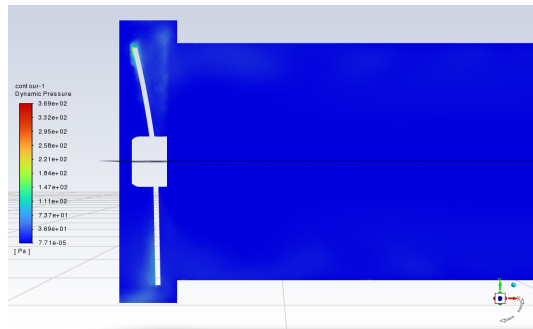


Figura 13: Mapa de presión dinámica para 4200 RPM.



Lineas de corrientes

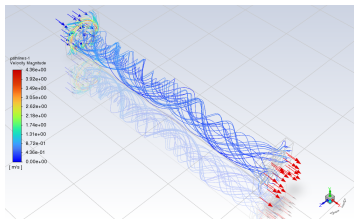


Figura 14: Líneas de corrientes para 833 RPM.

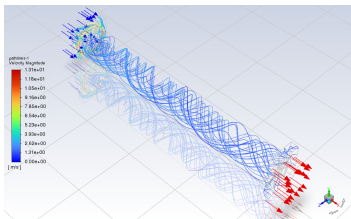


Figura 15: Líneas de corrientes para 2500 RPM.

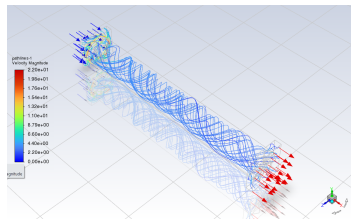


Figura 16: Líneas de corrientes para 4200 RPM.

Mapa de velocidad en salida (4200 RPM)

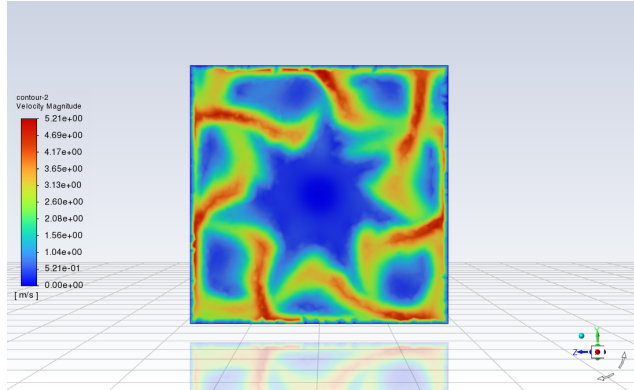


Figura 17: Mapa de velocidad en la salida para 4200 RPM.



Conclusiones principales

- El prototipo a escala y el modelo CFD muestran buena concordancia.
- La plataforma de adquisición basada en Arduino permite monitoreo en tiempo real de variables clave.
- Se estableció una línea base necesaria para entrenar futuros modelos de *machine learning* orientados a mantenimiento predictivo.





Trabajo futuro

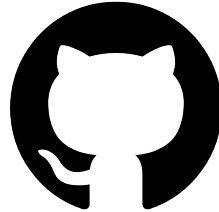
- Refinamiento del modelo CFD.
- Expansión de la instrumentación.
- Incorporación de técnicas de aprendizaje automático.
- Escalar el enfoque a ventiladores en faenas reales.
- Análisis técnico-económico.





Anexo: Códigos y scripts

- Código Arduino.
- Scripts base de datos SQLite.
- Interfaz web de control y visualización de datos.



Repositorio de Github:
github.com/diegoconchaa/fas

