

Article

Simulación CFD y Validación de Modelo Experimental de Ventilación Minera a Escala Laboratorio en Flujos Cercanos al Venitilador

Diego Concha ^{1,†,‡} , Michel Miranda ^{2,‡} y Sebastián Pérez ^{2,*}

¹ Universidad de Santiago de Chile; diego.concha.a@usach.cl

² Universidad de Santiago de Chile; michael.miranda.s@usach.cl

³ Universidad de Santiago de Chile; sebastian.perez@usach.cl

* Correspondence: e-mail@e-mail.com; Tel.: (optional; include country code; if there are multiple corresponding authors, add author initials) +xx-xxxx-xxx-xxxx (F.L.)

† Current address: Affiliation.

‡ These authors contributed equally to this work.

Abstract: El propósito central de este proyecto es crear un modelo digital que se aproxime al funcionamiento de los ventiladores utilizados en la minería. Este modelo se fundamentará en parámetros operativos clave que son determinantes en la eficiencia y seguridad de estos equipos. La simulación se llevará a cabo utilizando software especializado como ANSYS, un software de simulación de ingeniería que permita analizar el comportamiento de los componentes bajo diferentes escenarios operativos y predecir posibles fallos antes de que ocurran. La simulación tiene como objetivo ser utilizada para mejorar las prácticas de mantenimiento predictivo, por ejemplo, la generación de modelos de machine learning. Esto significa que, en lugar de realizar mantenimientos a intervalos regulares o esperar a que se presenten fallos, el mantenimiento se puede planificar basándose en las predicciones del modelo, lo cual puede resultar en una reducción significativa de tiempos muertos y costos de operación, además de aumentar la seguridad en las minas.

Keywords: Simulación; Ventilador; Mantenimiento; Predictivo; Machine Learning.

1. Metodología

1.1. Instrumentación y Sensores

1.2. Especificaciones Técnicas de los Sensores Utilizados

La selección de sensores se realizó considerando la necesidad de medir parámetros clave del modelo experimental, como vibraciones, flujo de viento y termografía. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas de cada sensor y su justificación para este estudio:

1.2.1. Medida de Corriente ACS712

- **Rango de medida:** ± 5 A, ± 20 A, o ± 30 A (dependiendo de la versión).
- **Precisión:** $\pm 1.5\%$ (típico).
- **Voltaje de salida:** Proporcional a la corriente detectada, con 185 mV/A para la versión de ± 5 A.
- **Frecuencia de respuesta:** 80 kHz.
- **Alimentación:** 5V DC.

Justificación: Permite medir el consumo eléctrico del ventilador, un indicador del esfuerzo operativo. Esto es clave para correlacionar el rendimiento mecánico con el consumo energético durante variaciones en el flujo de aire o vibraciones.

Citation: Concha, D.; Miranda, M.; Pérez, S. Simulación CFD y Validación de Modelo Experimental de Ventilación Minera a Escala Laboratorio en Flujos Cercanos al Venitilador. *Journal Not Specified* **2024**, *1*, 0. <https://doi.org/>

Received:

Revised:

Accepted:

Published:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted to *Journal Not Specified* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1.2.2. Sensor de Voltaje PWM Indirecta Modulada a 12V

30

- **Rango de medida:** 0-25 V.
 - **Precisión:** $\pm 1\%$.
 - **Frecuencia de muestreo:** Adaptado a señales PWM con modulaciones de hasta 20 kHz.
- 31
- 32
- 33
- 34

Justificación: Se utiliza para monitorear el voltaje aplicado al ventilador y analizar el impacto de variaciones de potencia en el comportamiento vibratorio y térmico. Su capacidad de medir señales PWM permite evaluar el control del ventilador.

35

36

37

1.2.3. Sensor de Temperatura Puntual LM35

38

- **Rango de medida:** $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - **Precisión:** $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente.
 - **Voltaje de salida:** Proporcional a la temperatura ($10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$).
 - **Tiempo de respuesta:** Menos de 1 segundo para cambios de temperatura.
 - **Alimentación:** 4-20 V DC.
- 39
- 40
- 41
- 42
- 43

Justificación: Ideal para medir temperaturas en puntos específicos del ventilador, como el motor o áreas críticas, permitiendo correlacionar el comportamiento térmico con el flujo de aire y las vibraciones.

44

45

46

1.2.4. Cámara Térmica AMG8833

47

- **Resolución térmica:** 8x8 píxeles (64 puntos de lectura).
 - **Rango de temperatura:** $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - **Precisión:** $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - **Frecuencia de actualización:** 10 FPS.
 - **Campo de visión:** $60^{\circ} \times 60^{\circ}$.
- 48
- 49
- 50
- 51
- 52

Justificación: Permite obtener un mapa térmico del ventilador durante la operación, identificando puntos calientes que pueden correlacionarse con anomalías en el flujo de aire o vibraciones. Esto es crucial para validar simulaciones térmicas.

53

54

55

1.2.5. Acelerómetro MPU6050

56

- **Rango de medida (aceleración):** $\pm 2\text{ g}$, $\pm 4\text{ g}$, $\pm 8\text{ g}$, $\pm 16\text{ g}$.
 - **Rango de medida (giroscopio):** $\pm 250^{\circ}/\text{s}$ a $\pm 2000^{\circ}/\text{s}$.
 - **Precisión:** 16 bits por eje (aceleración) y 16 bits por eje (rotación).
 - **Frecuencia de muestreo:** Hasta 1 kHz.
 - **Alimentación:** 3.3 V a 5 V DC.
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61

Justificación: Se utiliza para capturar datos vibratorios del ventilador en operación. Esto es esencial para analizar desequilibrios y validar modelos de vibración simulados.

62

63

1.2.6. Sensor de Flujo de Aire Indirecto (Anemómetro Fabricado y Calibrado Hasta 3.5V)

64

- **Rango de flujo:** 0-10 m/s.
 - **Voltaje de salida:** 0-3.5 V, proporcional al flujo de aire.
 - **Precisión:** $\pm 5\%$.
 - **Método de calibración:** Comparación con un anemómetro comercial.
- 65
- 66
- 67
- 68

Justificación: Mide el flujo de aire generado por el ventilador. La calibración asegura una relación lineal precisa entre el flujo y la señal de salida, permitiendo validar simulaciones de flujo aerodinámico.

69

70

71

1.3. Validez en la Elaboración del Modelo Experimental

72

- **Datos operativos representativos:** Los sensores seleccionados capturan las variables críticas necesarias para analizar el rendimiento y las anomalías operativas del ventilador.
- 73
- 74
- 75

• Compatibilidad con simulaciones: Los datos obtenidos (corriente, voltaje, temperatura, vibración y flujo de aire) son adecuados para compararlos con simulaciones CFD y análisis térmicos y estructurales.	76
• Escalabilidad: Las mediciones pueden extrapolarse para validar modelos de ventiladores mineros reales, justificando su utilidad para aplicaciones de mantenimiento predictivo.	77
	78
	79
	80
	81
1.3.1. Instalación y Calibración	82
Método de instalación y calibración.	83
1.4. <i>Simulación Computacional</i>	84
1.4.1. Herramientas y Software	85
Herramientas y software utilizados para las simulaciones (por ejemplo, CFD - Computational Fluid Dynamics).	86
	87
1.4.2. Condiciones de Contorno	88
Parámetros y condiciones de contorno definidos para la simulación.	89
1.4.3. Análisis de Sensibilidad de Malla	90
Discusión sobre el análisis de sensibilidad de malla.	91
1.5. <i>Modelo Analítico</i>	92
1.5.1. Análisis de Vibraciones	93
Análisis de vibraciones en base a datos de presión.	94
1.5.2. Comparación Empírica	95
Comparación con datos empíricos (Métricas de evaluación).	96
1.6. <i>Procedimiento Experimental</i>	97
1.6.1. Pasos Experimentales	98
Pasos seguidos durante la experimentación y simulación.	99
1.6.2. Recopilación y Análisis de Datos	100
Recopilación de datos y procedimientos de análisis.	101
2. Resultados	102
2.1. <i>Datos Experimentales</i>	103
2.1.1. Presentación de Datos	104
Presentación de los datos recopilados de los sensores.	105
2.1.2. Análisis Preliminar	106
Análisis preliminar de los datos.	107
2.2. <i>Resultados de Simulación</i>	108
2.2.1. Comparación de Resultados	109
Comparación de los resultados de simulación con los datos experimentales.	110
2.2.2. Discusión de Precisión	111
Discusión sobre la precisión y validez del modelo.	112

3. Discusión	113
3.1. <i>Interpretación de Resultados</i>	114
3.1.1. Robustez del Modelo	115
Robustez y eficiencia del modelo CFD (Sensibilidad y uso de recurso computacional).	116
3.1.2. Análisis de Métricas	117
Métricas de evaluación obtenidas, análisis.	118
3.2. <i>Validación del Sistema</i>	119
Error entre modelos.	120
3.3. <i>Limitaciones del Estudio</i>	121
Discusión sobre las limitaciones encontradas en el uso de ventiladores de PC y la escala del modelo.	122
	123
4. Conclusiones	124
4.1. <i>Recapitulación</i>	125
4.2. <i>Síntesis de los Hallazgos</i>	126
Resumen de los resultados clave.	127
4.3. <i>Analogía de Modelos e Implicaciones Prácticas</i>	128
Comparación entre el modelo a escala y las expectativas del comportamiento de un ventilador minero real.	129
	130
4.4. <i>Futuras Investigaciones</i>	131
Propuestas de cómo este estudio podría ser expandido o mejorado.	132
Author Contributions: For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, X.X. and Y.Y.; methodology, X.X.; software, X.X.; validation, X.X., Y.Y. and Z.Z.; formal analysis, X.X.; investigation, X.X.; resources, X.X.; data curation, X.X.; writing—original draft preparation, X.X.; writing—review and editing, X.X.; visualization, X.X.; supervision, X.X.; project administration, X.X.; funding acquisition, Y.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”, please turn to the CRediT taxonomy for the term explanation. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.	133
	134
	135
	136
	137
	138
	139
	140
Funding: Please add: “This research received no external funding” or “This research was funded by NAME OF FUNDER grant number XXX.” and “The APC was funded by XXX”. Check carefully that the details given are accurate and use the standard spelling of funding agency names at https://search.crossref.org/funding , any errors may affect your future funding.	141
	142
	143
	144
Institutional Review Board Statement: In this section, you should add the Institutional Review Board Statement and approval number, if relevant to your study. You might choose to exclude this statement if the study did not require ethical approval. Please note that the Editorial Office might ask you for further information. Please add “The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of NAME OF INSTITUTE (protocol code XXX and date of approval).” for studies involving humans. OR “The animal study protocol was approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of NAME OF INSTITUTE (protocol code XXX and date of approval).” for studies involving animals. OR “Ethical review and approval were waived for this study due to REASON (please provide a detailed justification).” OR “Not applicable” for studies not involving humans or animals.	145
	146
	147
	148
	149
	150
	151
	152
	153
	154
Informed Consent Statement: Any research article describing a study involving humans should contain this statement. Please add “Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.” OR “Patient consent was waived due to REASON (please provide a detailed justification).” OR “Not applicable” for studies not involving humans. You might also choose to exclude this statement if the study did not involve humans.	155
	156
	157
	158
	159

Written informed consent for publication must be obtained from participating patients who can be identified (including by the patients themselves). Please state “Written informed consent has been obtained from the patient(s) to publish this paper” if applicable.

Data Availability Statement: We encourage all authors of articles published in MDPI journals to share their research data. In this section, please provide details regarding where data supporting reported results can be found, including links to publicly archived datasets analyzed or generated during the study. Where no new data were created, or where data is unavailable due to privacy or ethical restrictions, a statement is still required. Suggested Data Availability Statements are available in section “MDPI Research Data Policies” at <https://www.mdpi.com/ethics>.

Acknowledgments: In this section you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Conflicts of Interest: Declare conflicts of interest or state “The authors declare no conflicts of interest.” Authors must identify and declare any personal circumstances or interest that may be perceived as inappropriately influencing the representation or interpretation of reported research results. Any role of the funders in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results must be declared in this section. If there is no role, please state “The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results”.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
DOAJ	Directory of open access journals
TLA	Three letter acronym
LD	Linear dichroism

Appendix A

Appendix A.1

The appendix is an optional section that can contain details and data supplemental to the main text—for example, explanations of experimental details that would disrupt the flow of the main text but nonetheless remain crucial to understanding and reproducing the research shown; figures of replicates for experiments of which representative data are shown in the main text can be added here if brief, or as Supplementary Data. Mathematical proofs of results not central to the paper can be added as an appendix.

Table A1. This is a table caption.

Title 1	Title 2	Title 3
Entry 1	Data	Data
Entry 2	Data	Data

Appendix B

All appendix sections must be cited in the main text. In the appendices, Figures, Tables, etc. should be labeled, starting with “A”—e.g., Figure A1, Figure A2, etc.

References

1.

Author 1, T. The title of the cited article. *Journal Abbreviation* **2008**, *10*, 142–149.

2.

Author 2, L. The title of the cited contribution. In *The Book Title*; Editor 1, F., Editor 2, A., Eds.; Publishing House: City, Country, 2007; pp. 32–58.

3.

Author 1, A.; Author 2, B. *Book Title*, 3rd ed.; Publisher: Publisher Location, Country, 2008; pp. 154–196.

4. Author 1, A.B.; Author 2, C. Title of Unpublished Work. *Abbreviated Journal Name* year, phrase indicating stage of publication (submitted; accepted; in press). 200
201
5. Author 1, A.B. (University, City, State, Country); Author 2, C. (Institute, City, State, Country). Personal communication, 2012. 202
6. Author 1, A.B.; Author 2, C.D.; Author 3, E.F. Title of presentation. In Proceedings of the Name of the Conference, Location of Conference, Country, Date of Conference (Day Month Year); Abstract Number (optional), Pagination (optional). 203
204
7. Author 1, A.B. Title of Thesis. Level of Thesis, Degree-Granting University, Location of University, Date of Completion. 205
8. Title of Site. Available online: URL (accessed on Day Month Year). 206

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content. 207
208
209