



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ

Título:

**Diseño y simulación de un sistema de ventilación en labores
subterráneas**

Jean Carlos Peñafiel Loor
Andy David Palma Loor

Tutor(a)

Ing. Jonathan Jiménez M.Sc.

Unidad Académica:

Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica.

Carrera:

Electromecánica

El Carmen, 19 de septiembre de 2025.

CERTIFICACION DEL TUTOR

Ing. Jonathan Jiménez, MSc. docente de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica, en calidad de Tutor(a).

CERTIFICO:

Que el presente proyecto integrador con el título: "Diseño y simulación de un sistema de ventilación en labores subterráneas" ha sido exhaustivamente revisado en varias sesiones de trabajo, está listo para su presentación y apto para su defensa.

Las opciones y conceptos vertidos en este documento son fruto de la perseverancia y originalidad de su(s) autor(es):

Jean Peñafiel Loor y Andy Palma Loor

Siendo de su exclusiva responsabilidad.

El Carmen, septiembre 2025.



Ing. Jonathan Jiménez MSc

TUTOR(A)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Quien(es) suscribe(n) la presente:

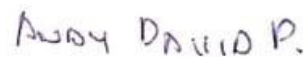
Andy Palma Loor y Jean Peñafiel Loor.

Estudiante(s) de la Carrera de **Tecnología superior en Electromecánica**, declaramos bajo juramento que el presente proyecto integrador cuyo título: "Diseño y simulación de un sistema de ventilación en labores subterráneas", previa a la obtención del Título de **Tecnólogo Superior en Electromecánica**, es de autoría propia y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros y consultando las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

El Carmen, septiembre 2025.



Jean Carlos Peñafiel Loor



Andy David Palma Loor



APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto Integrador, titulado: "Diseño y simulación de un sistema de ventilación en labores subterráneas" de su(s) autor(es): Andy David Palma Loor, Jean Carlos Peñafiel Loor de la Carrera "Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica", y como Tutor(a) del Trabajo el/la Ing. Jonathan Jiménez Mag.

El Carmen, 19 septiembre de 2025

A.S. Vladimir Minaya, Mag.
Presidente de Tribunal

Ing. Jonathan Jiménez Mag.
TUTOR(A)

Ing. Saed Reascos, Mag.
PRIMER MIEMBRO TRIBUNAL •

Ing. Clara Pozo, Mag.
SEGUNDO MIEMBRO TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por la vida y salud de nuestras familias quienes han sido personas fundamentales para poder alcanzar nuestros objetivos. Sus esfuerzos y amor son impresionantes, ya que a pesar de toda dificultad siempre se mantuvieron pendientes de nosotros para que podamos culminar nuestra carrera.

A nuestros amigos y compañeros que hemos conocido en este transcurso, gracias por las buenas y malas experiencias. Estamos seguros que estos recuerdos siempre estarán en nuestros corazones.

A la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, institución que nos abrió sus puertas y nos permitió formarnos en sus aulas, en las cuales hemos compartido ilusiones y anhelos.

A nuestros Ingenieros quienes fueron parte de nuestro crecimiento y formación profesional.

De una manera muy especial a nuestro tutor Ing. Jonathan Jiménez MSc quien ha estado siempre presente en nuestra formación académica, por sus consejos, por su instrucción y paciencia para poder culminar exitosamente nuestro sprojecto de investigación.

Andy Palma/Jean Peñafiel

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por darme bendiciones y mucho éxito para continuar mi carrera, por darme salud y todas las habilidades que necesite para la misma.

A mis abuelos Luis Loor e Yna Alcívar por su amor incondicional, siempre me mantuvieron de pie, me dieron apoyo emocional y económico, me enseñaron los valores de la disciplina y la constancia. Que Dios multiplique bendiciones sobre mi familia y sepa guiarnos en los momentos difíciles para que podamos seguir cumpliendo nuestros sueños.

A mi Madre Yolanda Loor quien ha sido parte fundamental en mi vida y me han dado fortaleza para poder alcanzar cada una de mis metas en la vida, por todo su apoyo que me ha brindado en toda mi formación académica y darme las fuerzas y esperanzas.

A todas las personas importantes en mi vida, como mis compañeros que me acompañaron durante toda la carrera haciendo un poco más fácil y divertido el camino hacia la meta.

Andy Palma

Dedico este trabajo a mis amados padres, quienes han sido mi mayor inspiración y ejemplo de esfuerzo, perseverancia y amor incondicional. Gracias por brindarme su apoyo en cada etapa de mi vida, por sus consejos sabios, por sus sacrificios silenciosos y por motivarme a alcanzar mis metas. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, porque sin su guía y confianza no habría sido posible. Con todo mi cariño, esta meta se la debo a ustedes.

Jean Peñafiel

RESUMEN

El trabajo en las minas presenta un inconveniente, ya que la contaminación del aire continuo es uno de los temas clave, la falta de ventilación adecuada puede provocar la acumulación de gases peligrosos, deficiencia de oxígeno, exceso de humedad y altas temperaturas, que representan una amenaza directa para la seguridad de los trabajadores y la operación de la planta. No hay productos o herramientas de ventilación bien diseñadas para simular su funcionamiento antes de su instalación, lo que resulta en ineficiencias operativas y altos costos debido a la seguridad ambiental.

El proyecto plantea el diseño y simulación de un sistema de ventilación para labores subterráneas, orientado a mejorar la seguridad y eficiencia en entornos confinados. Partiendo de una revisión de fundamentos teóricos y normativas como ASHRAE 62.1, se definieron los criterios técnicos para el caudal, renovaciones de aire y configuración del sistema. El desarrollo se estructuró en tres objetivos: investigación de principios de ventilación subterránea, diseño 3D en SolidWorks y simulación CFD para evaluar el flujo de aire.

El modelado tridimensional incluyó la galería, ductos, ventiladores y rejillas, optimizando la disposición de los componentes para un flujo continuo y seguro. La simulación CFD permitió analizar distribución de presión, velocidad y temperatura, identificando zonas con baja ventilación y proponiendo mejoras como reubicación de ventiladores y ajustes en la geometría de los ductos. Los resultados mostraron un flujo isotérmico estable (28,05 °C), caídas mínimas de presión ($\approx 0,72$ Pa) y velocidades máximas de 0,724 m/s, confirmando la eficacia del diseño.

Se concluye que el uso de herramientas CAD y CFD constituye un método preciso y económico para validar sistemas de ventilación antes de su implementación, optimizando recursos y garantizando condiciones seguras para los trabajadores en espacios confinados.

PALABRAS CLAVE

sistema de ventilación, SolidWorks, simulación CFD, CAD

ABSTRACT

Working in mines presents a downside, as continuous air pollution is one of the key issues; the lack of adequate ventilation can lead to the accumulation of hazardous gases, oxygen deficiency, excessive humidity, and high temperatures, which pose a direct threat to the safety of workers and the operation of the plant. There are no well-designed ventilation products or tools to simulate their operation before installation, resulting in operational inefficiencies and high costs due to environmental safety.

The project focuses on the design and simulation of a ventilation system for underground operations, aimed at improving safety and efficiency in confined environments. Based on a review of theoretical principles and standards such as ASHRAE 62.1, the technical criteria for airflow rate, air changes per hour, and system configuration were defined. The development was structured into three objectives: investigation of underground ventilation principles, 3D design in SolidWorks, and CFD simulation to evaluate airflow behavior.

The three-dimensional modeling included the gallery, ducts, fans, and grilles, optimizing component placement to ensure continuous and safe airflow. The CFD simulation analyzed pressure, velocity, and temperature distribution, identifying areas with poor ventilation and proposing improvements such as fan relocation and duct geometry adjustments. The results indicated a stable isothermal flow (28.05 °C), minimal pressure drops (≈ 0.72 Pa), and maximum velocities of 0.724 m/s, confirming the system's effectiveness.

It is concluded that the use of CAD and CFD tools constitutes an accurate and cost-efficient method for validating ventilation system designs prior to physical implementation, optimizing resources while ensuring safe working conditions in confined spaces.

KEYWORDS

ventilation system, SolidWorks, CFD simulation (Computational Fluid Dynamics simulation), CAD (Computer-Aided Design)

ÍNDICE

CERTIFICACION DEL TUTOR	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	I
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN¡Error! Marcador no definido.	
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA	V
RESUMEN	VI
PALABRAS CLAVE.....	VI
ABSTRACT	VII
KEYWORDS.....	VII
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. METODOLOGÍA.....	3
1.4.1. Procedimiento	3
1.4.2. Técnicas	4
1.4.3. Métodos	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. DEFINICIONES	7
2.2. ANTECEDENTES.....	11
2.3. TRABAJOS RELACIONADOS.....	11
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA	13
3.1. OBJETIVO 1	14
3.2. OBJETIVO 2	14

3.3. OBJETIVO 3	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
4.1. CONCLUSIONES	28
4.2. RECOMENDACIONES	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXOS	34

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ducto recto 3mx2mm.	21
Figura 2. Ducto recto 1mx2mm.	21
Figura 3. Ducto en L 90 grados 2mm.....	22
Figura 4. Ducto tipo T 2mm.....	22
Figura 5. Ensamblaje sistema ventilación.....	22
Figura 6. Presión del sistema.	24
Figura 7. Distribución de temperatura del sistema	25
Figura 8. Velocidad en el sistema.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Norma ASHRAE para ventilación subterránea.....	16
Tabla 2. Parámetros de diseño.....	20
Tabla 3. Características Ventilador 2400-VAX-1800	20
Tabla 4. Resumen de los análisis obtenidos.....	27

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La ventilación en las actividades subterráneas constituye un elemento crucial para asegurar tanto la seguridad como la eficacia en ambientes confinados. Mediante una adecuada circulación del aire, se puede gestionar la aparición de gases nocivos, conservar niveles óptimos de oxígeno, regular la temperatura y disminuir la humedad. Estas condiciones son fundamentales para salvaguardar la salud de los trabajadores y facilitar el correcto funcionamiento de los equipos empleados en entornos subterráneos. (García R. y., 2018).

En la actualidad, el empleo de herramientas digitales ha transformado radicalmente el diseño de sistemas de ventilación. Aplicaciones como SolidWorks facilitan la creación de modelos tridimensionales de túneles o galerías subterráneas, así como la simulación del comportamiento del flujo de aire, lo que permite prever posibles fallos y optimizar la ubicación de conductos y ventiladores. Tales simulaciones contribuyen a la toma de decisiones más acertadas sin requerir la realización de costosas o peligrosas pruebas físicas, aumentando así la eficiencia y la seguridad del sistema. (Kissell, 2003).

A nivel nacional e internacional, múltiples estudios han evidenciado la efectividad de estas herramientas en el ámbito del diseño de sistemas de ventilación en minas, túneles y espacios confinados. Estas experiencias anteriores demuestran que la simulación ha emergido como una metodología esencial para anticipar el desempeño del sistema y asegurar su adecuado funcionamiento antes de su implementación en el terreno. (Rodríguez D. , 2022).

El tema tratado adquiere una relevancia significativa debido a su influencia directa en la seguridad en el trabajo, la adherencia a normativas ambientales y la eficacia operativa en iniciativas relacionadas con la minería, la construcción y el mantenimiento de infraestructura subterránea. Un sistema que no esté bien concebido puede crear condiciones peligrosas que pongan en peligro la salud de los trabajadores y reduzcan la productividad del proyecto. (Urrutia, 2010).

Esta propuesta está estrechamente relacionada con la disciplina de Tecnología en Electromecánica, dado que combina conocimientos en diseño mecánico, análisis de sistemas, dinámica de fluidos y la utilización de software especializado. Facilita a los estudiantes la aplicación de habilidades técnicas

para abordar problemas concretos mediante herramientas tecnológicas contemporáneas, reforzando así su formación tanto profesional como práctica.. (Méndez, 2019)

1.1. PROBLEMA

El trabajo en las minas presenta un inconveniente, ya que la contaminación del aire continuo es uno de los temas clave, la falta de ventilación adecuada puede provocar la acumulación de gases peligrosos, deficiencia de oxígeno, exceso de humedad y altas temperaturas, que representan una amenaza directa para la seguridad de los trabajadores y la operación de la planta. No hay productos o herramientas de ventilación bien diseñadas para simular su funcionamiento antes de su instalación, lo que resulta en ineficiencias operativas y altos costos debido a la seguridad ambiental (da Silva, 2025).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Es una disciplina que brinda la oportunidad de utilizar el conocimiento teórico de la dinámica de fluidos, el diseño asistido por computadora y la ventilación industrial en un contexto práctico, ayuda a los estudiantes a desarrollar un diseño mecánico y un análisis científico mediante el uso de software avanzado como SolidWorks, que contribuye al proceso de capacitación profesional (Ramírez, 2023).

La propuesta, desde un punto de vista tecnológico, utiliza herramientas de simulación digital que nos permiten predecir el comportamiento de los sistemas de ventilación antes de su instalación física. Esto da como resultado ahorros de recursos, reducción de errores en la planificación y un aumento en la efectividad de los proyectos en espacios restringidos (Fernández, 2024).

Este trabajo está vinculado a la línea de investigación institucional, que se dedica a la innovación tecnológica y la mejora del proceso de los procesos industriales, mediante el uso de tecnologías avanzadas y automatizadas para resolver problemas reales del sector productivo (Manabí, 2023).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de ventilación para labores subterráneas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda de información de los principios de ventilación subterránea.
- Diseñar un sistema de ventilación modelo 3D para labores subterráneas utilizando un Software CAD.
- Simular el comportamiento del flujo del aire en un simulador CFD para proponer mejoras en el sistema.

1.4. METODOLOGÍA

1.4.1. Procedimiento

La presente investigación adoptó un enfoque metodológico que se centra en el examen computacional del flujo de aire dentro de una galería subterránea, haciendo uso de herramientas de diseño asistido por computadora y simulación de dinámica de fluidos. En primera instancia, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los fundamentos de ventilación en túneles, la dinámica de fluidos y la normativa técnica actual, como la NFPA 502 y las directrices correspondientes a la minería subterránea. Esta etapa facilitó la formulación de los principios teóricos y los criterios esenciales a tener en cuenta en la concepción del sistema. Se realizó el modelado tridimensional de la galería subterránea en el software SolidWorks, integrando su geometría real y los componentes del sistema de ventilación, incluyendo ventiladores axiales, ductos y rejillas de entrada y salida. Este modelo fue fundamental para establecer la simulación computacional del flujo de aire, empleando el módulo Flow Simulation, en el cual se definieron condiciones de contorno tales como velocidad de entrada, presión atmosférica, rugosidad de superficies internas y temperatura ambiental (Herrera, 2023).

Tras la configuración del entorno computacional, se realizaron simulaciones para investigar el comportamiento del flujo de aire en la galería subterránea. Se consideraron variables como la velocidad del aire, la distribución de presión, la tra

yectoria del flujo, el caudal volumétrico y las áreas potenciales de recirculación o estancamiento. Mediante el análisis de secciones transversales y la visualización de las líneas de corriente, se identificaron zonas críticas que requerían un rediseño. Los resultados obtenidos se compararon con los criterios establecidos en la literatura técnica para evaluar la eficiencia del sistema propuesto. A partir de estos hallazgos, se formularon recomendaciones de mejora, que incluyeron la optimización de la posición de los ventiladores, la ampliación de los ductos en ubicaciones estratégicas y la modificación de la geometría en áreas con pérdidas de carga. Finalmente, los datos fueron analizados desde una perspectiva técnica, evidenciando que la aplicación de herramientas de simulación CFD constituye una metodología válida y robusta para la validación de diseños en sistemas de ventilación subterránea. (López, 2024).

1.4.2. Técnicas

- **Modelado 3D o tridimensional.**

La elaboración de modelos tridimensionales es esencial para representar un diseño en su forma tangible antes de llevar a cabo su fabricación o implementación. Se utilizó SolidWorks para conceptualizar la estructura del túnel y los componentes del sistema de ventilación. (García León, 2020).

- **Simulación computacional.**

La simulación por computadora constituyó un enfoque esencial utilizado para modelar de manera virtual la dinámica del flujo de aire en ambientes subterráneos. Esta técnica permitió analizar condiciones operativas variables sin necesidad de recurrir a pruebas físicas, facilitando la identificación de zonas críticas con insuficiente ventilación. Se utilizó software especializado que integra principios de dinámica de fluidos para simular el comportamiento real de las corrientes de aire, permitiendo así optimizar el diseño antes de su implementación (Morán M. &, 2021).

- **Método de elementos finitos (FEM).**

El método de elementos finitos es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales complejas asociadas a fenómenos físicos. En este proyecto, se aplicó para modelar el flujo de aire a través de las galerías subterráneas, lo que permitió una mejor visualización de la distribución de

presión, velocidad y turbulencia en los túneles. Esta técnica resultó clave para predecir el comportamiento del sistema ante distintas configuraciones de ventilación y evaluar el rendimiento térmico y aerodinámico del diseño propuesto (González M. &, 2021).

La elaboración de una malla constituyó un componente fundamental en el proceso de simulación, dado que establece la exactitud del modelo. Se creó una malla tridimensional sobre el diseño CAD de la galería subterránea, segmentando el espacio en pequeños volúmenes finitos. Esta malla facilitó la resolución minuciosa de las ecuaciones de flujo, garantizando que los resultados de la simulación fueran confiables y con un margen de error reducido. Se aplicó una malla de alta densidad en áreas críticas como bifurcaciones, entradas de aire y obstáculos a fin de obtener resultados más precisos (Méndez R. &, 2023).

1.4.3. Métodos

- **Método analítico**

Este enfoque se centra en descomponer un problema complicado en sus elementos básicos mediante un análisis lógico, lo que ayuda a entender cómo se comporta el sistema según sus variables. En este proyecto, se utilizó para estudiar los principios de la ventilación subterránea, los requerimientos de caudal de aire establecidos por la normativa vigente y el comportamiento esperado del flujo en las galerías de trabajo. Con este método, fue posible examinar cada parte del sistema de ventilación desde una perspectiva tanto técnica como funcional (Morales R. , 2020) (Asociación Española de Normalización (AENOR), 2021).

- **Método experimental simulado**

Este procedimiento consiste en replicar de manera controlada las condiciones reales en un entorno virtual, lo que permite observar el comportamiento del sistema sin realizar pruebas físicas. Para esto, se utilizó el programa SolidWorks Flow Simulation, el cual ayudó a anticipar cómo se comportaría el aire en diferentes condiciones subterráneas. Además, este enfoque facilitó la evaluación de la eficacia del sistema de ventilación a través de varias configuraciones, como las velocidades del aire, la disposición de los ductos y las dimensiones del túnel, permitiendo así optimizar el diseño sin incurrir en gastos ni riesgos asociados a las pruebas en el campo (García M. A., 2022) (Pérez S. &, 2023).

- **Método deductivo**

Este enfoque comienza con teorías amplias para llegar a conclusiones particulares. En este documento, se utilizó para establecer la base técnica del sistema de ventilación, a partir de los principios de la física de fluidos y la ventilación industrial. A partir de estos fundamentos, se hicieron deducciones que facilitaron la predicción del comportamiento del flujo de aire en el modelo tridimensional propuesto, sin requerir pruebas experimentales previas. Esta metodología fue fundamental para justificar las decisiones técnicas tomadas durante la fase de simulación y diseño. (Hernández J. , 2021) (Zhang, 2024).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. DEFINICIONES

- **Fundamentos de la ventilación en espacios subterráneos**

El desarrollo de sistemas de ventilación para trabajos en entornos subterráneos constituye una área fundamental en el ámbito de la ingeniería electromecánica, dado que asegura condiciones apropiadas de aire respirable para los operarios, regula la temperatura, disminuye la humedad y dispersa gases nocivos. Un aspecto teórico central es el principio de ventilación industrial, que se define como el mecanismo a través del cual se proporciona aire puro y se elimina aire contaminado de un área cerrada, específicamente en galerías o túneles. La ventilación subterránea se categoriza comúnmente en dos tipos: la ventilación principal, que garantiza la circulación general de aire fresco desde el exterior; y la ventilación secundaria, que lo canaliza hacia áreas específicas donde se llevan a cabo las labores. Estos sistemas deben adherirse a normativas técnicas que establecen caudales mínimos por cada trabajador, límites máximos de contaminantes y velocidades adecuadas del aire (Domínguez, 2022).

Un segundo componente teórico esencial en este proyecto es la simulación computacional aplicada a sistemas de ventilación. Esta metodología facilita el análisis, la predicción y la optimización del comportamiento del flujo de aire a través de modelos tridimensionales elaborados en software especializado. Los métodos numéricos, tales como la dinámica de fluidos computacional, permiten la evaluación del comportamiento aerodinámico en túneles bajo diversas condiciones operativas, eliminando la necesidad de llevar a cabo pruebas físicas que resultan costosas. Adicionalmente, conceptos como la malla de elementos finitos, las condiciones de contorno y el análisis de turbulencia son fundamentales para alcanzar resultados precisos. La utilización de herramientas como SolidWorks Flow Simulation no solo respalda la validación del diseño teórico, sino que también propicia la identificación de mejoras orientadas a la eficiencia del sistema y la seguridad en el entorno laboral (González A. &, 2021).

- **Importancia de la ventilación en ambientes confinados.**

La correcta ventilación en áreas restringidas es esencial para la dilución y eliminación de contaminantes en el aire, así como para asegurar niveles de oxígeno que sean seguros y para controlar la temperatura y la humedad, lo que disminuye el riesgo de asfixia, envenenamientos y golpes de calor (Qian, 2018).

La ventilación se entiende como el proceso de introducción y eliminación de aire a través de métodos mecánicos o naturales, con el objetivo de eliminar calor, humedad y contaminantes, asegurando condiciones de higiene y confort para los ocupantes. Investigaciones recientes han evidenciado que una frecuencia de renovación del aire que supera las cuatro veces el volumen del espacio por hora previene la acumulación de gases pesados por encima de 1000 ppm, reduciendo de manera significativa el riesgo de exposiciones perjudiciales (Wang, 2024). Además, da Silva, 2025) señalan que la ausencia de ventilación continua es uno de los principales factores de riesgo en trabajos en espacios confinados dentro de la industria del petróleo, subrayando la necesidad de protocolos de ventilación previos y durante la entrada para prevenir incidentes graves.

- **Requisitos normativos y condiciones mínimas de calidad del aire**

La Norma Técnica de Calidad del Aire Ambiente (Libro VI, Anexo 4) dictada bajo la Ley de Gestión Ambiental y su Reglamento establece los límites máximos permisibles de los principales contaminantes para proteger la salud humana y el ambiente (Ecuador., 2011). Entre los requerimientos mínimos se incluyen que el promedio anual de PM_{10} no supere $50 \mu g/m^3$, con un máximo de $150 \mu g/m^3$ en 24 horas (no más de dos veces al año); para $PM_{2.5}$, un promedio anual máximo de $15 \mu g/m^3$ y $65 \mu g/m^3$ en 24 horas (no más de dos veces al año); SO_2 con un promedio anual de $80 \mu g/m^3$ y $350 \mu g/m^3$ en 24 horas; CO de $10\,000 \mu g/m^3$ en 8 horas y $40\,000 \mu g/m^3$ en 1 hora; O_3 de $120 \mu g/m^3$ en 8 horas y $160 \mu g/m^3$ en 1 hora; y NO_2 con $100 \mu g/m^3$ anual y $150 \mu g/m^3$ en 24 horas (Ecuador., 2011). Todas las mediciones deben realizarse a condiciones de referencia de $25^\circ C$ y 760 mm Hg, y corregirse según la presión y temperatura locales para garantizar la comparabilidad y validez de los resultados.

- **Tipos de sistemas de ventilación**

Los sistemas de ventilación se clasifican en natural, que aprovecha fuerzas del viento y el efecto chimenea a través de aberturas como ventanas y rejillas para renovar el aire sin equipos mecánicos (Ingénierie, 2025); mecánica de impulsión, que introduce aire filtrado mediante ventiladores controlando el caudal y permitiendo su acondicionamiento previo; mecánica de extracción, que extrae el aire viciado creando un ligero vacío que induce la entrada de aire fresco pasivo; equilibrada o de doble flujo, que combina impulsión y extracción mecánica con recuperador de calor para igualar los volúmenes introducidos y expulsados, optimizando la eficiencia energética e híbrida, que alterna entre ventilación natural y mecánica según las condiciones ambientales para mantener una renovación óptima y reducir el consumo energético (Ingénierie, 2025).

- **Ventilación natural.**

Según la revista Orión los sistemas de ventilación naturales está prácticamente basado en el aprovechamiento de las corrientes de aires naturales como lo son las corrientes de convección y las corrientes de viento, las cuales están estrictamente y nos ayudan a promover un aire y tener una circulación de aire en los espacios que están comúnmente confinados o espacios cerrados, como se podría lograr todo esto es a través de los que hoy en día se conocen como aperturas estratégicas de puertas o cualquier tipo de abertura que nos permita tener un flujo o circulación del aire o través de los mecanismos que estén diseñados para el mismo (Orión, 2023).

- **Ventilación mecánica: sistemas impelentes, aspirantes y mixtos.**

La ventilación mecánica es la que esta implementada a través de los equipos y sistemas que están mecanizados para forzar las entradas y corrientes del aire fresco, y están mecanizados para extraer el aire contaminado esto tiene un logro por parte de extractores o ventiladores que se utilizan para los espacios que están confinados los cuales permiten tener un flujo de aire que está controlado y se mantiene constante (Delgado, 2022).

- **Sistemas impelentes:** Introducen aire limpio desde el exterior hacia el interior del espacio, purificando el ambiente y desplazando los contaminantes hacia las salidas. Son útiles cuando se necesita oxigenar

zonas específicas o desplazar contaminantes livianos (González M. &, 2023).

- **Sistemas aspirantes:** logran hacer una extracción del aire contaminado del interior, generando una presión negativa que succiona aire limpio desde el exterior. Son especialmente eficaces para retirar gases densos o acumulaciones en zonas profundas (Martínez, 2023).
- **Sistemas mixtos:** hacen ambas combinaciones estrategias, introduciendo aire limpio a los espacios cerrados y extrayendo el contaminado de forma simultánea, lo que permite una mejor circulación y control de la calidad del aire (Torres, 2024).
- **Componentes principales: ventiladores, ductos, rejillas y mangas.**

Los sistemas de ventilación mecánica se componen de una serie o de varios elementos los cuales son fundamentales que nos permitan garantizar su eficiencia:

- **Ventiladores:** Se les denomina dispositivos encargados de producir el movimiento del aire. Su clasificación puede ser axial o centrífuga, en función del diseño y de las exigencias de presión y flujo (MSHA, 2022).
- **Ductos:** Canales que orientan los movimientos del aire hacia áreas determinadas. Pueden ser de carácter rígido o flexible, y es fundamental que estén adecuadamente sellados para prevenir fugas de aire, las cuales impedirían alcanzar un rendimiento óptimo.
- **Rejillas:** Permiten la entrada o la salida de aire en lugares determinados del sistema, controlando el flujo y resguardando las aperturas de obstrucciones o la entrada de objetos.
- **Mangas de ventilación:** Son conductos flexibles, muy utilizados en minería subterránea, que transportan aire a zonas de difícil acceso o en desarrollo. Suelen estar fabricadas con materiales resistentes y ligeros.
- Cada uno de estos componentes debe ser seleccionado y mantenido adecuadamente para asegurar una ventilación continua y eficaz, especialmente en ambientes de alto riesgo.

2.2. ANTECEDENTES

En la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí (ULEAM), la carrera de Tecnología en Electromecánica ha promovido el desarrollo de proyectos orientados a la aplicación de herramientas de diseño y simulación para resolver problemas reales en contextos industriales. A lo largo de los recientes períodos académicos, se han promovido proyectos integradores en los cuales los estudiantes examinan situaciones prácticas vinculadas a la ventilación, el control de la temperatura, la eficiencia energética y la automatización. Estas iniciativas buscan potenciar las habilidades técnicas de los futuros especialistas, promoviendo el empleo de herramientas como el modelado tridimensional, el análisis computacional y la implementación de normativas técnicas en contextos de simulación (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (INNSO), 2023).

En el pasado, ha habido propuestas para la ventilación industrial en espacios cerrados, pero la mayoría no se ha centrado en los desafíos únicos del trabajo subterráneo. Hay una falta de investigación sobre sistemas de aire acondicionado para edificios o ventilación mecánica en túneles de infraestructura urbana. Posible este espacio vacío prueba la importancia de este proyecto, lo que no solo considera el diseño técnico de un sistema de ventilación, sino que también utiliza simulación computacional para verificar su rendimiento. Esta es una sugerencia para un nuevo proyecto de investigación que combina el conocimiento académico y técnico con el uso de la tecnología en los sectores industriales y mineros. (Pérez L. &., 2024).

2.3. TRABAJOS RELACIONADOS

A nivel internacional, se han llevado a cabo investigaciones de gran relevancia en relación a la ventilación subterránea. En el contexto europeo, particularmente en Alemania, se realizó un estudio sobre la adopción de sistemas de ventilación inteligente en minas de carbón subterráneas, utilizando sensores de Internet de las Cosas y análisis de Dinámica de Fluidos Computacional para optimizar el flujo de aire y disminuir las concentraciones de gas metano. Este trabajo se constituyó como un referente para la formulación de nuevas directrices en seguridad minera y eficiencia energética. La integración de datos en tiempo real

junto con simulaciones computacionales demostró ser una metodología eficaz para la toma de decisiones en operaciones (Morales D. &, 2020).

En la región de América Latina, una investigación efectuada en Perú se centró en la elaboración de un sistema de ventilación para minas de pequeña escala, empleando software especializado en el análisis de fluidos. El proyecto subrayó la relevancia de representar de manera tridimensional el entorno de la mina con el fin de calcular de manera precisa el flujo necesario y determinar la ubicación óptima de los ductos y ventiladores. La simulación permitió identificar zonas críticas donde la circulación del aire era deficiente y propuso soluciones técnicas viables con bajo costo de implementación. Este tipo de proyectos fortalecen el enfoque de seguridad ocupacional en la minería artesanal. (González A. &, 2021).

Dentro del ámbito ecuatoriano, se llevó a cabo un proyecto en la provincia de Pichincha que se enfocó en simular la ventilación en túneles diseñados para instalaciones hidroeléctricas. En este análisis, se empleó software especializado para modelar el movimiento del aire en presencia de dispositivos que generan calor. Se evaluaron diversas configuraciones de ventiladores axiales y extractores con el fin de optimizar el confort térmico y reducir el consumo de energía. El enfoque adoptado fue predominantemente técnico, generando resultados que pueden ser aplicados a otros tipos de túneles industriales (Pérez L. &, 2024).

En la provincia de Manabí, hasta el momento, no se han detectado proyectos asociados con la ventilación en actividades subterráneas, lo que representa una evidente oportunidad para la innovación en el ámbito académico. A pesar de existir estudios enfocados en ventilación general o sistemas de extracción de aire en espacios cerrados, no se ha abordado de manera específica el diseño y simulación de un sistema de ventilación aplicado a excavaciones subterráneas. Esto resalta la importancia y el aporte original del presente trabajo, el cual contribuirá al desarrollo de soluciones aplicadas en contextos técnicos poco explorados dentro del entorno local. (Pérez L. &, 2024)

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Se examina el desarrollo práctico de la propuesta para el diseño y simulación de un sistema de ventilación destinado a actividades subterráneas, conforme a los objetivos del proyecto con el fin de asegurar una presentación lógica y coherente. Se especificarán los criterios utilizados para la selección y caracterización de los componentes esenciales, tales como ventiladores, ductos, rejillas y sensores de flujo y calidad del aire, junto a sus especificaciones técnicas y la justificación de su aplicación en el ámbito subterráneo. Se ofrecerán diseños minuciosos y diagramas esquemáticos que representen la ubicación y conexión de cada elemento en la galería de trabajo, incluyendo vistas isométricas y secciones transversales.

Se incluirá un análisis sobre el dimensionamiento y la simulación numérica del flujo de aire a través de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), llevando a cabo cálculos de pérdidas de carga, velocidades críticas y renovaciones de aire por hora para corroborar las condiciones de confort y seguridad. Se presentará un desglose detallado de los costos estimados relacionados con la adquisición, instalación y puesta en marcha del equipamiento, organizado por partidas y vinculado a los hitos específicos de cada objetivo. Se agregarán los planos constructivos en formato CAD, junto a las instrucciones para el montaje y otros elementos gráficos que faciliten la comprensión y guíen su implementación en el campo. Esto garantiza la transparencia y la trazabilidad de cada fase del proyecto. Permite al lector seguir, paso a paso, el proceso de desarrollo y evaluación del sistema de ventilación.

3.1. DESARROLLO

Esta sección presenta la implementación práctica de la propuesta desarrollada para abordar el problema identificado en el Capítulo I. Se describe el proceso mediante el cual se lograron los objetivos específicos, detallando la metodología empleada, las etapas clave del proceso, los recursos económicos asignados y otros aspectos técnicos relevantes. Los resultados obtenidos se expondrán en la sección siguiente, donde se evaluará el nivel de cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos.

Descripción de la propuesta

La propuesta elaborada en esta acción se enfoca en la creación del sistema de ventilación y la simulación de las operaciones subterráneas, con el propósito de asegurar una adecuada circulación de aire y condiciones seguras para los trabajadores en un entorno restringido. El proceso se organizó en torno a tres objetivos específicos que habilitaron al proyecto a evitar la investigación aorética hasta la validación del diseño mediante la informatimulación. Esta metodología integrada no solo nos permitió comprender los principios básicos de la ventilación subterránea, sino que también utiliza herramientas tecnológicas para optimizar el rendimiento del sistema propuesto.

- **Objetivo específico 1**

El primer objetivo era buscar información sobre los principios que controlan la ventilación subterránea. Esta etapa fue importante para obtener una base técnica estable que nos permitió comprender los fenómenos del flujo de aire en túneles, geometría espacial, necesidades de restauración aérea y métodos utilizados para contaminar la extracción. Este estudio define los criterios de diseño para el desarrollo del sistema, como el flujo de aire requerido, la tasa de ventilación mínima y los tipos de ventilación (forzado, naturalmente o combinado) esto en función de norma ASHRAE.

- **Objetivo específico 2**

El segundo objetivo era centrarse en el diseño del sistema de ventilación de tres dimensiones utilizando el software de diseño de asistente de computadora (CAD), particularmente SolidWorks. En esta fase, el sistema de galerías subterráneas fue diseñado utilizando dimensiones estandarizadas y contaba con

un conducto de ventilación que replica la circulación del aire en el interior. El diseño abarcaba elementos técnicos como la ubicación del ventilador, la conexión del túnel y la dirección del flujo. Este modelo constituyó la base para una simulación más amplia del comportamiento del aire y una propuesta de mejoras estructurales fundamentadas en el análisis de los resultados.

- **Objetivo específico 3**

El tercer objetivo era imitar la estructura del flujo de aire utilizando la dinámica de líquido de cálculo (CFD). Se creó el módulo de simulación de flujo SolidWork, las condiciones del borde, la entrada de aire y la salida, y la simulación se realizó para observar la distribución de energía en todo el sistema. Se permitió a este paso identificar áreas con baja ventilación, evaluar la velocidad del aire en varias industrias de la galería y evaluar la eficiencia del sistema. Según los resultados obtenidos, se propusieron mejoras técnicas para optimizar el rendimiento del sistema de ventilación, lo que contribuyó a condiciones de trabajo más seguras en el espacio subterráneo.

3.1.1. Etapas

- **Etapas 1: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 1.**

La norma ASHRAE define tres tipos de sistemas de ventilación mecánica: el sistema de extracción, que consiste en expulsar el aire contaminado del interior mediante conductos hacia un punto de descarga controlado; el sistema de impulsión o inyección, que introduce aire fresco directamente desde el exterior generando sobrepresión y forzando la salida del aire viciado por aberturas no controladas (puertas, ventanas y rendijas) ; y el sistema mixto, que combina ambas estrategias con un caudal de extracción ligeramente mayor que el de suministro para crear una presión negativa suave que optimiza la renovación de aire y reduce el consumo energético, siendo el más utilizado en aplicaciones exigentes como parqueaderos subterráneos .

Según la norma ASHRAE, el procedimiento para dimensionar un sistema de ventilación en espacios subterráneos se desarrolla en cinco pasos secuenciales: primero, se define el tipo de sistema de ventilación más adecuado —ya sea por extracción, impulsión o mixto—; a continuación, se determina el caudal de ventilación necesario para mantener las concentraciones de contaminantes por

debajo de los límites permisibles; el tercer paso consiste en calcular las renovaciones de aire por hora para asegurar un recambio efectivo del aire viciado; luego se procede al diseño de la red de conductos, considerando su trazado, seccionamiento y pérdidas de carga; y, finalmente, se seleccionan los equipos —ventiladores, rejillas y reguladores de caudal— que cumplirán con los requisitos de desempeño establecidos por la norma

Según ASHRAE 62.1 (y recomendaciones de su Handbook), los parámetros de diseño más comunes para la ventilación de estacionamientos subterráneos son los siguientes:

Tabla 1. Norma ASHRAE para ventilación subterránea.

Parámetro	Valor recomendado	Notas
Tasa mínima continua de ventilación	0.75 cfm/ft ² ($\approx$ 3.8 L/s·m ²)	Operación continua durante horas de ocupación
Capacidad máxima de extracción	1.5 cfm/ft ² ($\approx$ 7.6 L/s·m ²)	Para picos de generación de contaminantes
Ventilación controlada por demanda	0.05 cfm/ft ² ($\approx$ 0.25 L/s·m ²) hasta 0.75 cfm/ft ²	Ajuste automático según sensores de CO
Renovaciones de aire por hora (ACH)	6–12 ACH	Asegura recambio efectivo del aire
Presión interna	Neutra o ligeramente negativa	Evita fugas de contaminantes hacia espacios adyacentes
Límites de CO para control (referencia)	35 ppm (1 h) / 9 ppm (8 h)	Valores de EPA/OSHA usados habitualmente como criterio para demanda de ventilación

- **Etapla 2: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 2.**

Para llevar a cabo el diseño tridimensional del sistema de ventilación, se eligió el software SolidWorks, dado su potencial para modelar estructuras complejas con precisión y su capacidad para integrarse con componentes mecánicos. En primer lugar, se definieron las dimensiones estándar de la galería subterránea basándose en criterios técnicos y normativos, lo que permitió establecer el ancho, la altura y la longitud del túnel. A continuación, se creó un modelo tridimensional preciso que representaba la estructura interna del túnel, incluyendo sus intersecciones y posibles ramales. En este entorno virtual se

incorporó un sistema de ventilación, ejemplificado por un conducto que simulaba tanto la entrada de aire limpio como la salida de aire contaminado.

Asimismo, fueron identificadas las ubicaciones más adecuadas para los diferentes componentes del sistema, tales como la disposición del ventilador principal, el trazado de las intersecciones y la dirección del flujo de aire en el túnel. Posteriormente, se llevó a cabo una validación técnica del diseño para asegurar que cumpliera con los requisitos previamente establecidos, entre ellos la continuidad del flujo, la accesibilidad y la adecuación al tipo de ventilación propuesto. Finalmente, el modelo fue ajustado para su uso en simulaciones computacionales del flujo de aire, lo que permitió analizar su comportamiento en diferentes escenarios. Los resultados obtenidos sirvieron como fundamento para sugerir mejoras estructurales que optimicen el rendimiento del sistema de ventilación subterránea.

- **Etapla 3: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 3.**

Con el propósito de examinar el comportamiento del flujo aéreo en el túnel, se realizó la configuración del entorno de simulación utilizando SolidWorks Flow Simulation, activando el módulo pertinente de dinámica de fluidos computacional (CFD). Se establecieron las condiciones de contorno requeridas para lograr una representación fiel del sistema, definiendo variables tales como el caudal o la presión de entrada del aire, las condiciones de salida del aire contaminado, así como las características físicas de las paredes del túnel, que incluyen su rugosidad y temperatura. Tras la definición de estos parámetros, se procedió a ejecutar la simulación, lo que permitió la observación de la distribución del flujo en el interior de la galería, la identificación de las velocidades del aire en diferentes secciones y la localización de áreas con ventilación insuficiente o flujo restringido. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de los resultados obtenidos, comparándolos con los estándares técnicos que se habían establecido en fases anteriores del proyecto, lo que permitió evaluar la efectividad del sistema diseñado. En este análisis se identificaron zonas problemáticas que presentaban pérdidas de presión o insuficiencias en la circulación de aire. A partir de estos descubrimientos, se sugirieron mejoras técnicas, tales como ajustes en la ubicación de los ventiladores, rediseño de los

ductos de aire o modificaciones estructurales dentro del túnel. Finalmente, se constató que la implementación de estas mejoras contribuiría de manera significativa a la creación de un entorno laboral seguro, asegurando niveles adecuados de ventilación en el espacio subterráneo.

3.1.2. Presupuesto

Todo el trabajo de diseño CAD, modelado, simulación y elaboración de planos, diagramas y documentación técnica fue ejecutado con los recursos y software proporcionados por la institución. No se asumieron gastos adicionales, pues tanto el personal como las herramientas y el soporte informático necesarios

3.2. RESULTADOS

- **Objetivo 1: Logros obtenidos en el objetivo 1.**

Se basó en consolidar las bases teóricas de con los parámetros de la literatura y la investigación que se especializa en los modelos y los principios de que son físicos y que a la vez se rigen en las normativas de los cuales se componen la ventilación en los espacios subterráneos, por lo cual se determinó y se logra hacer una comprensión de los aspectos fundamentales de cómo se comportan los flujos de aire en túneles subterráneos tomando en cuenta la geometría espacial y como se generan los contaminantes y cuáles son los requerimientos para la renovación del aire, además de hacer una clasificación y una breve identificación de cuáles serían los métodos más eficaces ya que lograrían utilizar para hacer una extracción de los contaminantes que se encuentren dentro de los espacios confinados lo cuales pueden llegar a implicar su diseños y las estructuras que lo conforman los sistemas de ventilación.

Para la elaboración y simulación de un sistema de ventilación en un entorno subterráneo de características moderadas (sin motores de combustión, con tareas ligeras y baja densidad poblacional), resulta esencial iniciar con el cálculo del caudal requerido para asegurar la calidad del aire. En este sentido, se establece un valor de ventilación de 7–10 L/s por persona, en conformidad con la normativa ASHRAE 62.1 para ocupaciones de baja intensidad, con el objetivo de mantener la concentración de CO₂ por debajo de 1000 ppm. Además, se plantean entre 6 y 8 renovaciones de aire por hora (ACH), suficientes para diluir

el calor metabólico, la humedad residual y posibles partículas en suspensión sin generar corrientes excesivas.

La geometría del túnel subterráneo sección transversal, longitud y ramificaciones debe modelarse con alta fidelidad, ya que determina directamente las velocidades del flujo y las posibles zonas de recirculación. En paralelo, el análisis de pérdidas de carga debe contemplar tanto la fricción distribuida a lo largo de los conductos como las pérdidas locales en codos, rejillas y transiciones. Este balance de presiones orienta la selección de un ventilador axial de baja presión y alto caudal, verificando que su punto de operación se sitúe dentro de la región estable de la curva caudal-presión.

Para la simulación CFD, es crucial definir apropiadamente las condiciones de contorno: entradas con velocidad o caudal uniforme, salidas a presión atmosférica de referencia y paredes con condición de no deslizamiento. Si bien el trabajo es ligero y el ambiente puede considerarse isotérmico (aprox. 25 °C), conviene incluir esta variable solo si se prevé un aporte térmico significativo.

De acuerdo con la normativa ASHRAE 62.1 para ambientes de baja densidad ocupacional y teniendo en cuenta que en nuestro túnel subterráneo no hay motores de combustión sólo emisiones de CO₂ por exhalación humana, el caudal mínimo por persona queda en torno a 7 L/s. Si estimamos una ocupación máxima simultánea de apenas 20 personas (trabajo leve, poca gente), el caudal estrictamente 0,14 m³/s.

Los antecedentes del proyecto, en los que se indica que el túnel subterráneo tiene una sección transversal promedio de 10 m² y una longitud de 360 m, su volumen interior se calcula como:

$$V = A \times L = 10 \text{ m}^2 \times 360 \text{ m} = 3600 \text{ m}^3$$

Para garantizar al menos 6 renovaciones de aire por hora (6 ACH) requisito habitual en espacios subterráneos de características moderadas, el caudal de diseño debe cumplir:

$$Q = 6 \left(\frac{\text{renovaciones}}{h} \right) \times 3600 \text{ m}^3 = \frac{21600 \text{ m}^3}{h} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$$

De este modo, con Q = 6 m³/s cubrimos las 6 ACH que diluyen eficazmente el CO₂ exhalado por el personal (manteniéndolo por debajo de 1000 ppm) y

evacuamos el calor y la humedad metabólica sin sobredimensionar el sistema. Este valor se adopta como parámetro de caudal en la simulación CFD, definiendo en la condición de contorno de entrada un flujo total de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ distribuido uniformemente sobre la sección del conducto principal.

Tabla 2. Parámetros de diseño.

Parámetro	Valor	Unidad	Notas
Caudal de entrada (Q)	6,0	m^3/s	Definido en la condición de contorno de flujo total sobre la sección del ducto principal.
Presión de salida	0	Pa (gauge)	Presión de referencia ambiente.
Velocidad de entrada	$\approx 0,6$	m/s	Perfil uniforme: $v=Q/A$, con área de entrada $\approx 10 \text{ m}^2$.
Temperatura del flujo	20	$^{\circ}\text{C}$	Flujo isotérmico (trabajo leve, aporte térmico bajo).
Rugosidad de pared (ϵ)	0,045	mm	Equivalente a acero liso.
Renovaciones de aire (ACH)	6	renovaciones/h	Validación: $Q \cdot 3600/V=6$.

A continuación, la tabla con las principales características del ventilador modelo 2400-VAX-1800 según el catálogo, para mayor información en el anexo 1 se encuentra el catálogo.

Tabla 3. Características Ventilador 2400-VAX-1800

Parámetro	Especificación	Unidad
Modelo	2400-VAX-1800	–
Diámetro de impulsor	24	in (610 mm)
Diámetro de carcasa	18	in (457 mm)
Velocidad nominal	2 950	rpm
Rango de flujo de aire	5 000 – 14 500	CFM (2,36–6,85 m^3/s)
Presión estática máxima	10	in.w.g. ($\approx 2\,500 \text{ Pa}$)
Potencia motriz	5 – 25	HP (3,7–18,6 kW)
Voltaje	460 V	VAC
Frecuencia	60	Hz
Fases	3	–
Corriente plena (máx.)	26	A
Eficiencia del conjunto	$\approx 70 \%$	%
Nivel de ruido (a 3 m)	82	dB(A)
Peso aproximado	140	kg

Considerar que el fluido a ventilar es aire.

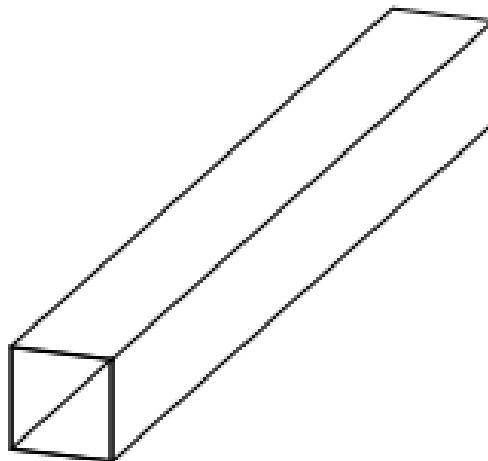
- **Objetivo 2: Logros obtenidos en el objetivo 2.**

Para alcanzar este objetivo, se utilizó el software SolidWorks como la herramienta principal de diseño asistido por computadora (CAD), gracias a su habilidad para generar modelos tridimensionales precisos, planos técnicos y simulaciones mecánicas. El diseño del sistema de ventilación se basó en un entorno subterráneo real previamente caracterizado, donde era necesario implementar un sistema efectivo para la renovación del aire en condiciones de espacio confinado.

Se modelaron con exactitud todos los componentes del sistema, incluyendo ductos de ventilación, ventiladores axiales, entrada y salida de aire, así como la estructura de la galería subterránea. Cada uno de estos elementos se diseñó cumpliendo con dimensiones reales, normativas técnicas aplicables y las condiciones operativas específicas del entorno minero.

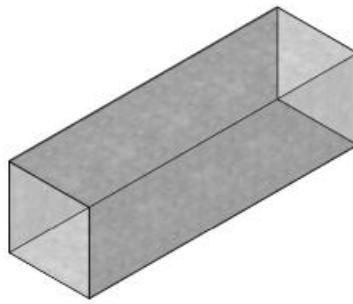
A continuación, se muestran los planos técnicos elaborados en SolidWorks, que constituyen el diseño final. Estos planos abarcan vistas isométricas, secciones transversales, cotas de referencia y ensamblajes estructurales, los cuales funcionarán como fundamento para una posible implementación futura del sistema.

Figura 1. Ducto recto 3mx2mm.



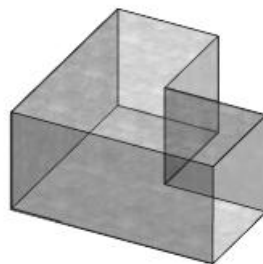
Fuente: Autoria propia

Figura 2. Ducto recto 1mx2mm.



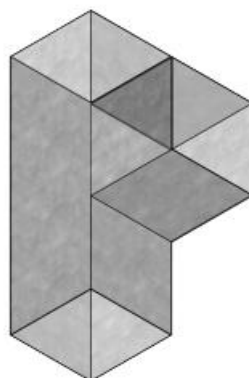
Fuente: Autoria propia

Figura 3. Ducto en L 90 grados 2mm.



Fuente: Autoria propia

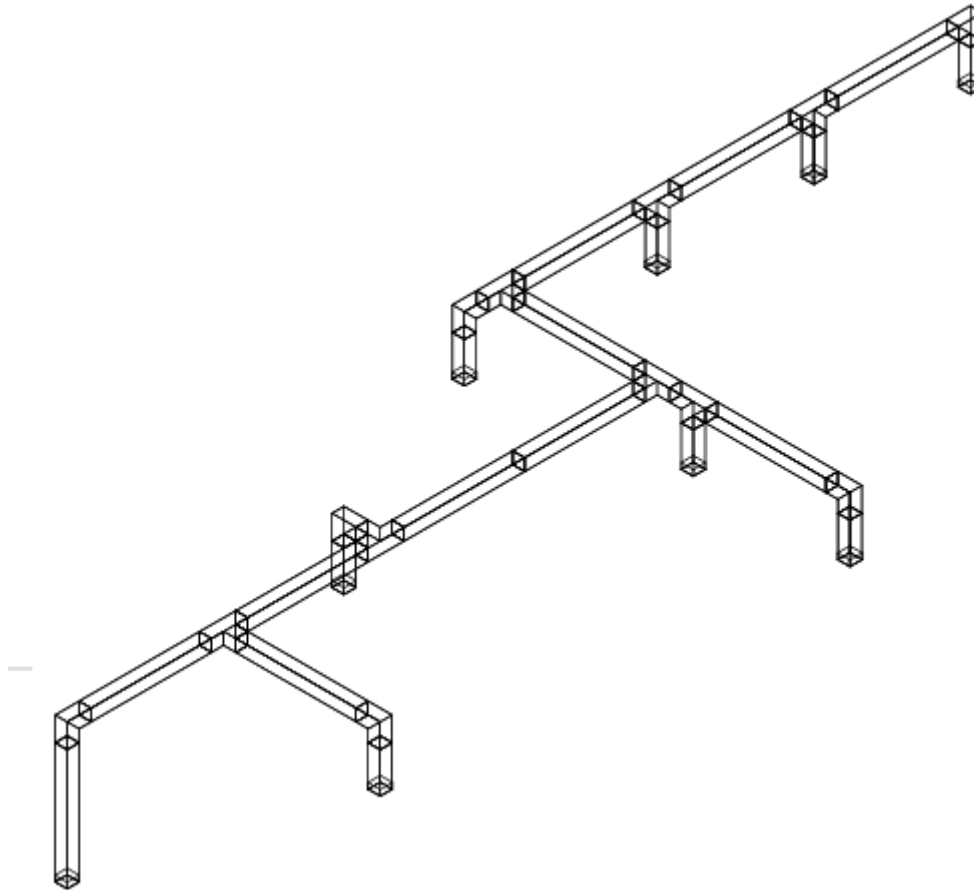
Figura 4. Ducto tipo T 2mm.



Fuente: Autoria propia

A continuación se muestra el ensamblaje culminado de todo el sistema:

Figura 5. Ensamblaje sistema ventilación.



Fuente: Autoria propia

La utilización de SolidWorks posibilitó una visualización precisa del sistema sugerido, facilitando modificaciones en la fase de diseño y garantizando que todos los componentes se integren de manera coherente en el espacio subterráneo.

- **Objetivo 3: Logros obtenidos en el objetivo 3.**

Al tener un éxito dentro de los entornos de la simulaciones que se hicieron dentro del sistema de SolidWorks Flow Simulation, lograron definir cuáles fueron las condiciones dentro de los contornos los cuales fueron realistas para lo cual se determinó la temperatura, presión, caudal y la rigusidad con las que se lograron tener una perfecta ejecución los cuales se visualizan las distribuciones de las corrientes o los flujos de aire, dentro de las zonas de recirculación tomando en cuenta las velocidades, y las caídas de la presión de aire.

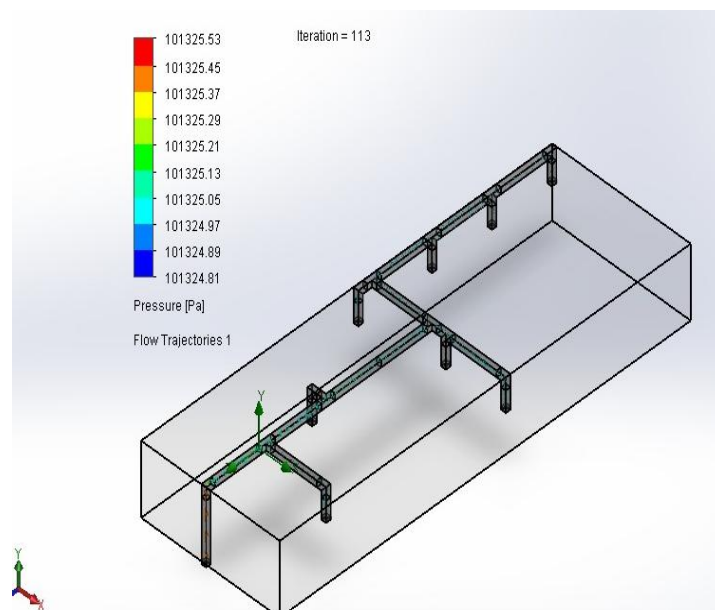
Al identificar los puntos críticos con un bajo nivel de ventilación para lo cual se lograron proponer hacer una mejora de las estructuras en los diseños de los ductos de ventilación o reubicarlos, las validaciones que el sistema nos permite cumplir con los estándares tecnificados para lo cual se establece dentro de los espacios que están siendo confinados, además que la demostración de la utilidad que nos puede brindar la simulación CFD, como parte de una de las herramientas más confiables que nos permita anticipar cual es el comportamiento real del sistema de la simulación, lo cual nos puede llegar a proponer sin llegar a incurrir en los costos de los campos habituales.

- **Simular el comportamiento del flujo dentro del sistema para evaluar presión y temperatura**

- **Presión**

Con el fin de analizar el comportamiento del flujo interno del sistema de distribución, se realizaron simulaciones CFD utilizando SolidWorks Flow Simulation. Las siguientes imágenes corresponden a los resultados de presión y temperatura obtenidos luego de 113 iteraciones, donde se observa la dinámica del fluido en condiciones estacionarias.

Figura 6. Presión del sistema.



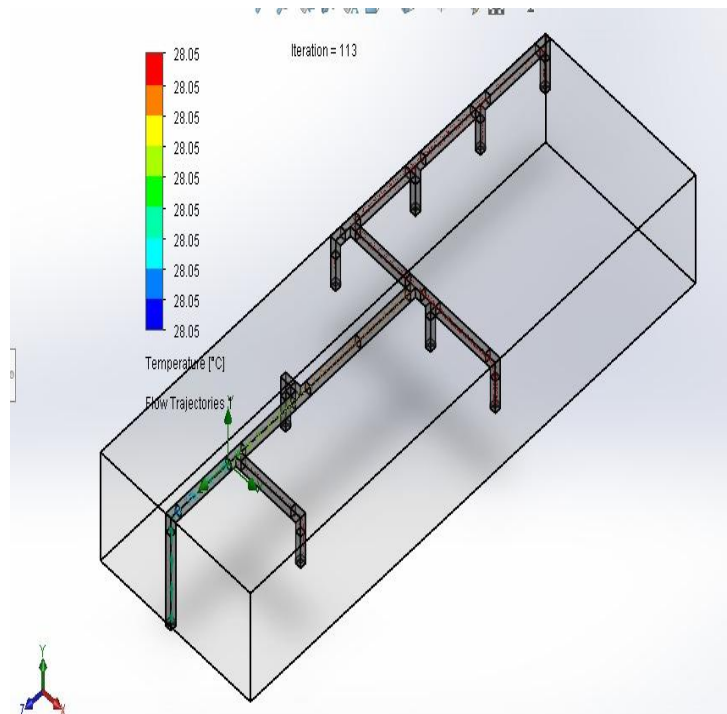
Fuente: Autoria propia

En esta imagen se representa la distribución de presión absoluta en pascales (Pa). La variación de colores, desde el azul al rojo, indica los cambios mínimos de presión a lo largo del sistema. Se aprecia una ligera caída de presión desde la entrada hacia la salida del sistema, lo cual es esperable debido a la pérdida de carga por fricción en las tuberías y codos. La presión se mantiene en un rango muy estrecho (101324.81 – 101325.53 Pa), lo que sugiere que el sistema opera con un flujo de baja resistencia.

– Temperatura

Esta imagen muestra la temperatura en la superficie de las tuberías. La escala de color es constante en 28.05 °C, lo que indica que no existe una variación térmica significativa en la estructura externa del sistema. Esto es indicativo de un fluido en equilibrio térmico o de un entorno sin intercambio significativo de calor.

Figura 7. Distribución de temperatura del sistema



Fuente: Autoria propia

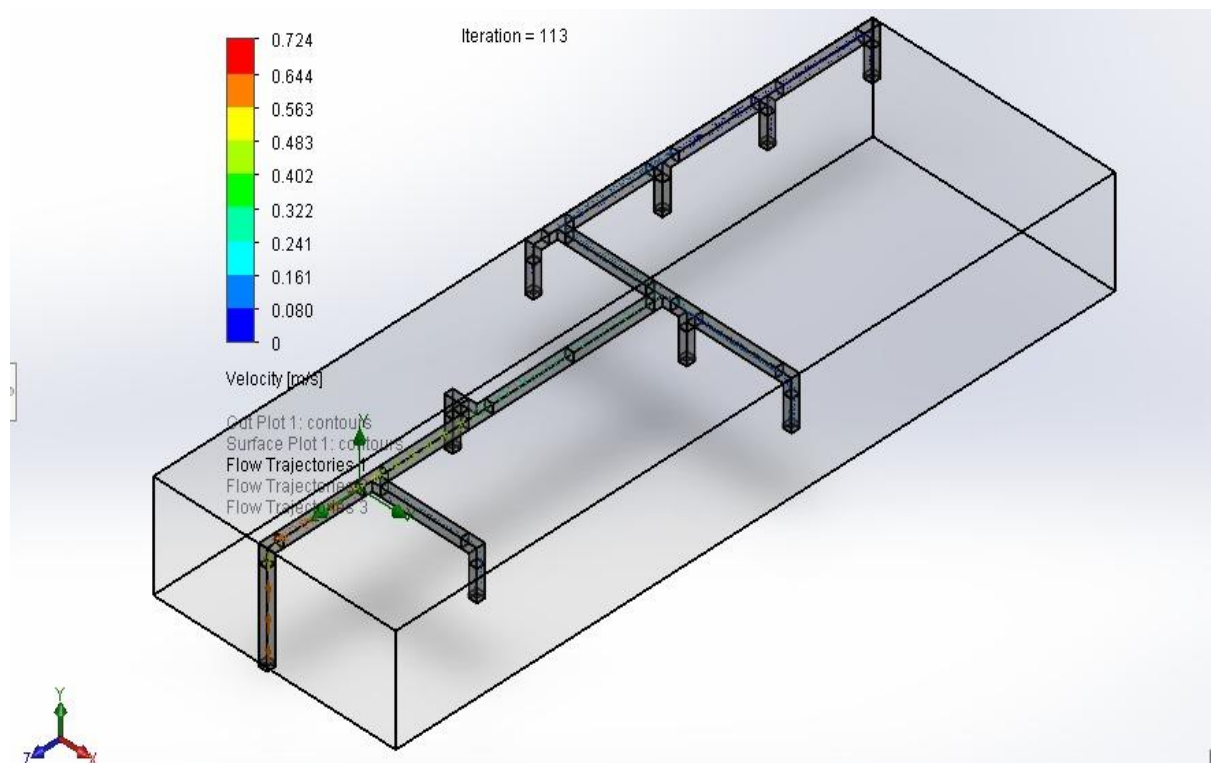
Aquí se analiza la temperatura interna del fluido que circula dentro del sistema. De manera similar a la imagen anterior, se observa que el fluido mantiene una temperatura constante de 28.05 °C en todo el recorrido. Esto reafirma que el flujo

es isotérmico y que no se ha generado una variación térmica por efecto de fricción, pérdida de energía o transferencia de calor con el entorno.

– Velocidad

La figura muestra la simulación del comportamiento del flujo de aire en un sistema de conductos a través de un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD). Se puede observar la distribución de las velocidades a lo largo del conducto principal, así como en sus ramificaciones. La gama de colores representa los niveles de velocidad en metros por segundo (m/s), donde el color rojo indica las áreas de mayor velocidad (hasta 0.724 m/s) y el color azul representa las zonas de menor velocidad. Las trayectorias de flujo permiten visualizar el patrón de movimiento del aire, demostrando cómo se distribuye a través de las distintas salidas del sistema. Esta simulación corresponde a la iteración 113 del análisis, lo que sugiere un estado estable en la convergencia del flujo.

Figura 8. Velocidad en el sistema.



Fuente: Autoría propia

A continuación se presenta la tabla resumen de resultados correspondiente a los resultados obtenidos, donde se sintetizan los principales valores

numéricos obtenidos en la simulación CFD bajo régimen estacionario. La tabla consolida, de forma compacta, las métricas clave para el análisis del comportamiento hidráulico y térmico del sistema: criterio de convergencia (iteraciones), rango de presión absoluta y su ΔP asociado, temperatura tanto en la superficie de las tuberías como en el fluido interno, y la velocidad máxima local observada. Estos indicadores permiten una lectura rápida del desempeño global del modelo con especial énfasis en la estabilidad del campo térmico (condición prácticamente isotérmica) y las pérdidas de carga sirviendo como base para la discusión y validación de resultados en las secciones posteriores.

Tabla 4. Resumen de los análisis obtenidos.

Métrica	Valor obtenido	Unidad	Comentario / Fuente
Régimen y convergencia	113	iteraciones	Simulación en condiciones estacionarias.
Presión absoluta (rango)	101324.81 – 101325.53	Pa	Caída muy ligera a lo largo del sistema ($\Delta P \approx 0.72$ Pa, calculado a partir del rango).
Temperatura (superficie de tuberías)	28.05	°C	Sin variación térmica apreciable.
Temperatura (fluido interno)	28.05	°C	Flujo isotérmico en todo el recorrido.
Velocidad máxima local	0.724	m/s	Pico observado en la distribución de velocidades.

Fuente: Autoría propia

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- En el contexto de todo lo que se ha detallado dentro de los argumentos y los textos es importante dar un punto de vista más objetivo y establecido para llevar a cabo la meta que se a establecido y los objetivos que se han especificado, establecer como una base la cual debe ser teórica y consolidad desde las revisiones aplicando las normas técnicas desde los puntos de la bibliografía la cual estaba especializada en los sistemas de ventilación subterránea, todo estos argumentada nos permitió lograr y tener un visión clara de los principios que se rigen en los flujos y corrientes de aire dentro de los túneles subterráneos, argumentado los criterios según lo que se nos recomendaba en las normas ASHRAE, toda la investigación informativa que se obtuvo nos permitió como parte de soporte y guía para lograr los desarrollos de las simulaciones 3D y lograr tener las simulaciones que estaban establecidas.
- Con el sistema de diseño de SolidWorks, se logró hacer una representación con la finalidad de la geometría por parte de una de las galerías subterráneas y donde se podían ubicar los componentes que son parte del sistema de ventilación, los modelos 3D logro hacer una generación de una plataforma lo cual fue técnica y que fue valida dentro de las simulaciones computacionales, lo que nos permitió analizar las corrientes y la distribución de los flujos de aire de una manera correcta y precisa, y determinar y lograr identificar los problemas dentro de las estructuras de ventilación.
- Los comportamientos de los flujos de aire se hicieron a través una simulación CFD, lo cual nos permitía ver e identificar las corrientes de aire en las zonas más conocidas como críticas y que pueden llegar a tener un déficit dentro de las ventilaciones, dentro de estos resultados que se han propuesto y se han obtenido, se hacen unas mejoras técnicas que nos permitan lograr una optimización en los sistemas teniendo una adecuada renovación de aire en caso de ser necesario, y tener las condiciones más seguras y tener las condiciones con las debidas precauciones y

seguridad para los obreros, además de hacer una comprobación de las herramientas de las simulaciones computacionales, logran constituir los métodos de eficiencia y la precisión económica para el desarrollo y diseño de los sistemas de ventilación en los espacios cerrados o confinados.

4.2. RECOMENDACIONES

- En la parte de diseño se puede recomendar mantener el sistema lo más simple y coherente posible con los objetivos de ventilación: trazados limpios, componentes estandarizados y márgenes de seguridad razonables. Diseña pensando en operación y mantenimiento (accesos, limpieza, reemplazos) y utiliza la simulación solo como apoyo para iterar el layout, no como fin en sí mismo.
- En la parte de simulación se puede recomendar que al definir un flujo de trabajo claro y repetible: objetivos medibles, supuestos explícitos, condiciones de contorno consistentes y criterios de calidad (convergencia, estabilidad). Evalúa escenarios representativos (nominal, demanda alta, contingencia) y valida lo esencial con mediciones simples. Documenta todo para que los resultados sean trazables y defendibles.

BIBLIOGRAFÍA

- García, R. y. (2018). *Modelado y simulación en ingeniería mecánica*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.
- Kissell, F. (2003). *Handbook for Methane Control in Mining*. Pittsburgh,PA: NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).
- Rodríguez, D. (2022). *Diseño de un sistema de ventilación para minería artesanal mediante simulación CFD*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/19461/1/53T0065.pdf>
- Urrutia, E. (2010). *Diseño y metodología de cálculo para la optimización de sistemas de ventilación en minas subterráneas*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/323345526.pdf>
- Méndez, C. y. (2019). Aplicación de SolidWorks en la formación técnica de ingenieros: estudio de caso en universidades latinoamericanas. *Revista Iberoamericana de Educación Tecnológica*, 10(2), 55-64.
- Morán, M. &. (2021). *Principios de transferencia de calor y mecánica de fluidos*. Madrid, España: Pearson Educación.
- González, M. &. (2021). *Diseño asistido por simulación computacional de sistemas de ventilación minera*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Domínguez, J. &. (2022). *Diseño de sistemas de ventilación industrial*. Lima, Perú: Editorial Técnica Minera.
- González, A. &. (2021). Simulación computacional aplicada a ventilación en túneles. *Revista de Ingeniería y Tecnología Aplicada*, 18(2), 45-58.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (INNSO). (2023). *Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional*. Obtenido de Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional: <https://www.innso.gob.ec/ventilacion2023>
- Morales, D. &. (2020). Análisis CFD para la mejora del flujo de aire en ambientes confinados. *Journal of Engineering Simulation*, 14(1), 60-74.
- Pérez, L. &. (2024). *Ventilación y climatización en infraestructuras subterráneas del Ecuador*. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

- Morales, R. (2020). Métodos analíticos para el diseño de sistemas de ventilación subterránea. *Revista Latinoamericana de Ingeniería*, 15(2), 45-62.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). *UNE 100011: Ventilación para espacios confinados*. Madrid, España: AENOR.
- García, M. A. (2022). Simulación computacional de sistemas de ventilación en minería subterránea. *Editorial Ingeniería Aplicada*, 8(1), 10-24.
- Pérez, S. &. (2023). Evaluación del comportamiento del flujo mediante software CFD. *Journal of Computational Fluid Dynamics*, 18(1), 123-139.
- Hernández, J. (2021). *Principios de física de fluidos y ventilación industrial*. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Técnica.
- Zhang, Y. &. (2024). *Underground ventilation systems: design and simulation*. Berlín, Alemania: Springer.
- Qian, H. Z. (2018). Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings. . *Journal of Thoracic Disease*, , 10((Suppl 19)), S2295–S2304. <https://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>.
- Wang, T. L. (2024). Enhancing heavy gas capture in confined spaces through ventilation control technology. . *Building Simulation*(17), 1161–1182. <https://doi.org/10.1007/s12273-024-1131-8>.
- da Silva, C. M. (2025). Study on safely working in confined spaces in the petroleum industry: Risk factors, current control procedures, and alternatives. . *Journal of Industrial Safety*,(2), (1). <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2025.04.005>.
- Ecuador., M. d. (2011). *Norma técnica de calidad del aire ambiente* . Norma técnica de calidad del aire ambiente (Libro VI, Anexo 4). Quito, Ecuador.
- Ingénierie, E. (2025). *EOLIOS*. Obtenido de ¿Qué es la ventilación natural?. : <https://eolios.es/ingenieria-hvac/que-es-la-ventilacion-natural/>
- Ramírez, A. &. (2023). Aplicación del diseño asistido por computadora en la enseñanza de ventilación industrial. *Revista Latinoamericana de Ingeniería y Tecnología*, 9(1), 67-75. Obtenido de <https://doi.org/10.5678/relait.v9i1.2023>
- Fernández, L. &. (2024). Simulación digital aplicada al diseño de sistemas de ventilación en espacios confinados. *Tecnología e Innovación en Ingeniería*, 18(2), 102-110. Obtenido de <https://doi.org/10.5897/tei.v18i2.2024>
- Manabí, U. L. (2023). *Lineamientos de investigación: Innovación tecnológica y procesos industriales*. Manta, Ecuador: Dirección de Investigación y

Vinculación. Obtenido de <https://www.uleam.edu.ec/documentos-investigacion-2023>

Herrera, S. &. (2023). Aplicación del análisis CFD y modelado 3D en la ventilación de túneles subterráneos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Aplicada*, 11(4), 88-97. Obtenido de <https://doi.org/10.3348/ribia.v11i4.2023>

López, F. &. (2024). Validación de sistemas de ventilación subterránea mediante simulación CFD. *Avances en Ingeniería y Simulación*, 7(1), 41-53. Obtenido de <https://doi.org/10.5412/ais.v7n1.2024>

Méndez, R. &. (2023). Importancia del mallado en simulaciones CFD para sistemas de ventilación. *Ingeniería y Modelado Computacional*, 10(2), 77-86. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/imc.v10i2.2023>

Orión, R. (2023). Ventilación natural en espacios confinados: estrategias pasivas para el flujo de aire. *Revista Orión de Ciencia y Tecnología*, 14(2), 58-64. Obtenido de <https://www.revistaorion.ec/ventilacion-natural-2023>

Delgado, C. &. (2022). *Sistemas de ventilación mecánica en espacios industriales*. Bogotá, Colombia: Ingeniería y Desarrollo Técnico.

González, M. &. (2023). *Sistemas de ventilación: principios y aplicaciones en espacios confinados*. Santiago, Chile: Instituto de Ingeniería Ambiental.

Martínez, R. &. (2023). *Técnicas de extracción de aire en espacios confinados*. Buenos Aires, Argentina: Centro de Estudios en Ingeniería Ambiental.

Torres, V. &. (2024). *Ventilación combinada en espacios confinados: enfoques prácticos*. Lima, Perú: Asociación Latinoamericana de Seguridad Industrial.

Orion Seguridad. (s.f.). *Ventilación en espacios confinados: una medida esencial de prevención*. <https://orionseguridad.es/ventilacion-en-espacios-confinados/>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012, octubre 10). *Acuerdo Ministerial N.º 050: Norma de calidad del aire*. Registro Oficial N.º 50. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Acuerdo-50-NCA.pdf>

Mine Safety and Health Administration (MSHA). (2022). *Code of Federal Regulations – Title 30: Mineral Resources*. U.S. Department of Labor. <https://www.msha.gov/regulations>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). *Reglamento de seguridad minera* (Decreto Supremo N.º 132). Gobierno de Chile. <https://repositorio.sernageomin.cl/server/api/core/bitstreams/771f7a91-f52c-4d35-ae4a-9be149a7f88d/content>

Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (3rd ed.). Springer.

Dassault Systèmes. (2023). *SolidWorks Flow Simulation*.

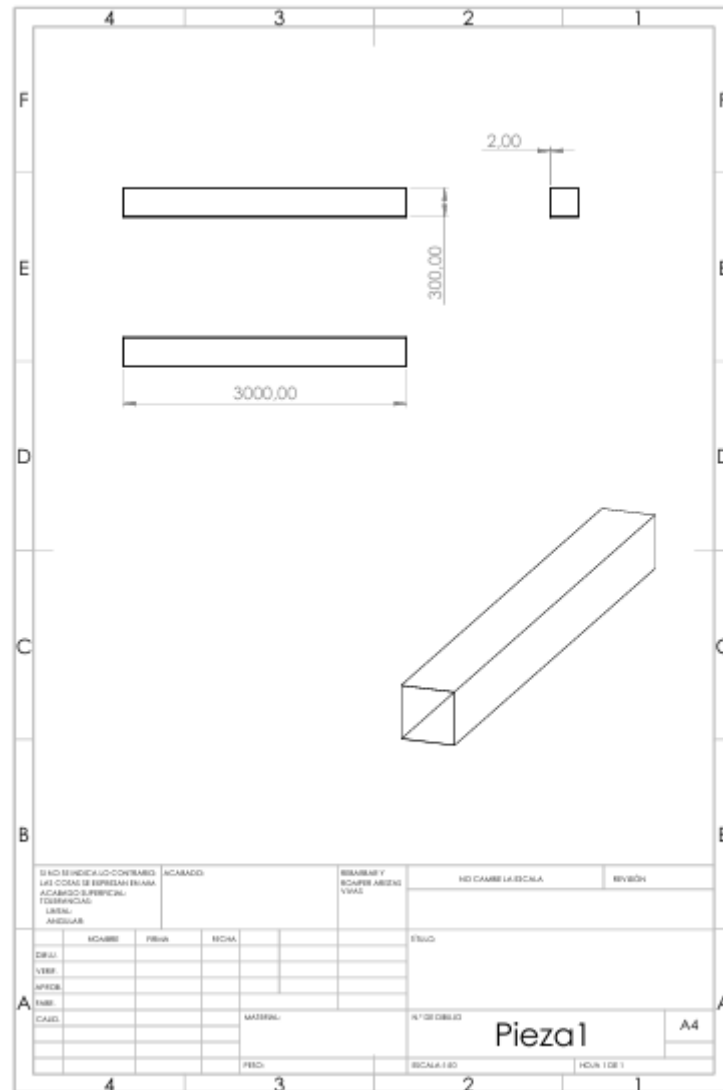
<https://www.solidworks.com>

Howden Group. (2023). *Ventsim DESIGN*. <https://www.ventsim.com>

Kovács, N., Papp, B., & Magyar, M. (2021). *CFD-based analysis of underground mine ventilation efficiency*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(2), 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.01.005>

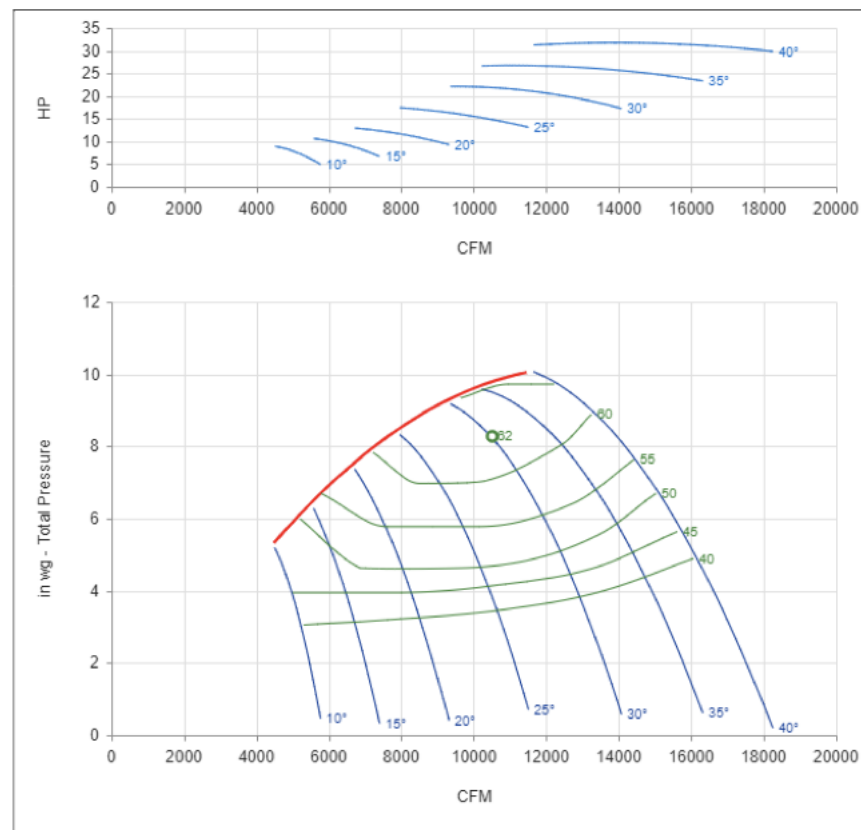
ANEXOS

Anexo 1. Planos en SolidWorks

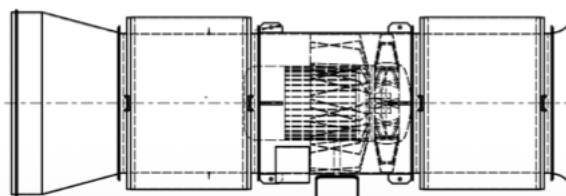


Ventilador 2400-VAX-1800

2800-VAX-1800 / 1 Stage / Full Blade / 2950 RPM



Datos Técnicos 50 Hz	2400-VAX-1800
Tipo de ventilador	Ventilador axial de paletas
Diámetro carcasa	24"
Diámetro hub	18"
Rango de caudal aproximado	5.000 – 14.500 CFM
Rango de presión aproximado	3,0 – 9,0 in.w.g.
Rango de potencias recomendadas	Hasta 25 HP
Velocidad del eje nominal	2950 RPM
Uso de Silenciadores	Opcional
Uso de conexión a manga	Opcional
Tipo de arranque recomendado	Estrella - Triángulo





tesis andy palma,jean peñañiel1 FINAL1

6%
Textos
sospechosos

- 3% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
- 3% Idiomas no reconocidos
- 25% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: tesis andy palma,jean peñañiel1 FINAL1.docx
ID del documento: e3cf2defcecc5f1245a1e4e50d360b709e0051e1
Tamaño del documento original: 2,02 MB

Depositante: JONATHAN PAÚL JIMENEZ GONZALES
Fecha de depósito: 12/8/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 12/8/2025

Número de palabras: 9363
Número de caracteres: 64.191

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	MIGUE-CESAR-ELECTROMECANICA.pdf MIGUE-CESAR-ELECTROMECANICA... #303ce0 Viene de de mi grupo	1%		Palabras idénticas: 1% (114 palabras)
2	TFM-2024-2-04.pdf TFM-2024-2-04 #2386ec Viene de de mi grupo	1%		Palabras idénticas: 1% (100 palabras)
3	repositorio.uileam.edu.ec https://repositorio.uileam.edu.ec/bitstream/123456789/4678/1/UILEAM-INFOR-0131.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (63 palabras)
4	TRABAJO DE IMPLEMENTACION- DEMO 2 R (1).docx TRABAJO DE IMPL... #f66c72 Viene de de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (54 palabras)
5	Documento de otro usuario #a753c4 Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	doi.org Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aero... https://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)
2	hdl.handle.net Diseño y metodología de cálculo para la optimización de sistem... https://hdl.handle.net/20.500.12672/11142	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (13 palabras)
3	doi.org https://doi.org/10.1007/s12273-024-1131-8	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/19461/1/53T0065.pdf>
- <https://core.ac.uk/download/pdf/323345526.pdf>
- <https://www.innso.gob.ec/ventilacion2023>
- <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2025.04.005>
- <https://eolios.es/ingenieria-hvac/que-es-la-ventilacion-natural/>