



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**REDISEÑO DE SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA EL
CONTROL DE LA RECIRCULACIÓN DEL AIRE EN LAS
LABORES DE LA VETA ÚRSULA 5 DE LA UNIDAD MINERA LAS
ÁGUILAS - CIEMSA**

TESIS

PRESENTADA POR:

SEBAS ABEL PAYE QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS


PUNO - PERÚ

2025



Sebas Abel Paye Quispe

REDISEÑO DE SISTEMA DE VENTILACION PARA EL CONTROL DE LA RECIRCULACION DEL AIRE EN LAS LABORES DE LA

 Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:576697152

102 páginas

Fecha de entrega

9 abr 2026, 7:11 p.m. GMT-5

15.936 palabras

82.667 caracteres

Fecha de descarga

9 abr 2026, 7:32 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

REDISEÑO DE SISTEMA DE VENTILACION PARA EL CONTROL DE LA RECIRCULACION DEL AIRE EN....docx

Tamaño del archivo

4.9 MB





13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)
- Trabajos entregados

Fuentes principales

- 13% Fuentes de Internet
- 5% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.


Arturo Rafael Chayña Rodríguez
INGENIERO DE MINAS
CP: 100226
DOCENTE UNAP




Dr. Ambal Sucari León
Director de la Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería de Minas - UNAP





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
TESIS

**REDISEÑO DE SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DE
LA RECIRCULACIÓN DEL AIRE EN LAS LABORES DE LA VETA
ÚRSULA 5 DE LA UNIDAD MINERA LAS ÁGUILAS – CIEMSA**

**TESIS PRESENTADA POR:
SEBAS ABEL PAYE QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**



APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:

.....
Ing. HENRY ARNALDO TAPIA VALENCIA

PRIMER MIEMBRO:

.....
D.Sc. ESTEBAN MARIN PAUCARA

SEGUNDO MIEMBRO:

.....
Mtro. EMMANUEL HERNAN TUMY GOMEZ

ASESOR DE TESIS:

.....
Mtro. ARTURO RAFAEL CHAYÑA RODRIGUEZ

ÁREA : Ingeniería de minas.

TEMA: Servicios auxiliares requeridos en operaciones mineras.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 22 de Diciembre de 2025



DEDICATORIA

Para mi querida madre María Margarita Quispe Coyla de Paye que desde el cielo ve por toda su familia y en vida fue mi más grande apoyo incondicional durante mi etapa de formación académica y profesional en todo el tiempo que estuvo acompañándome, por los consejos de superación y seguir adelante ante cualquier adversidad.

A mi querida familia, por el apoyo moral en los momentos más difíciles de mi formación profesional y vida.

Sebas Abel Paye Quispe



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios por otorgarme salud, bienestar y guiarme por el buen camino y poder ser un buen profesional.

Mi más sincero agradecimiento; A mi alma mater la Universidad Nacional del Altiplano, a su facultad de Ingeniería de Minas y docentes quienes me inculcaron, formaron y sobre todo compartieron con sus experiencias profesionales, de vida y conocimientos los cuales contribuyeron en mi formación profesional.

Agradecer a mi director de tesis Mtro. Arturo Rafael Chayña Rodríguez por la paciencia, comprensión que me otorga al guiarme, aconsejándome a lo largo de todo el proceso de investigación. Sus consejos, recomendaciones y comentarios han sido muy valiosas en este proceso muy importante de mi vida profesional para poder cumplir con mis objetivos trasados.

Por último, agradecer a familiares, amigos y colegas, que colaboraron y aconsejaron para poder realizar la presente investigación, la cual me permitió acceder y obtener la información y desarrollar esta investigación.

Sebas Abel Paye Quispe



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2.1. Pregunta general.....	20
1.2.2. Preguntas específicas.....	20
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. Hipótesis general	20
1.3.2. Hipótesis específicas	21
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.4.1. Objetivo general	21
1.4.2. Objetivos específicos.....	21
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	22



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	24
2.2.	MARCO TEÓRICO	29
2.2.1.	Aire de la atmósfera	29
2.2.2.	Aire de mina	29
2.2.3.	Gases de mina.....	30
2.2.3.1.	Dióxido de carbono (CO ₂).....	30
2.2.3.2.	Monóxido de carbono (CO).....	30
2.2.3.3.	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	30
2.2.3.4.	Metano (CH ₄).....	31
2.2.4.	Ventilación de mina	31
2.2.4.1.	Ventilación Natural.....	31
2.2.4.2.	Ventilación mecánica.....	32
2.2.4.3.	Sistema de ventilación	32
2.2.5.	Ventiladores	35
2.2.5.1.	Ventiladores centrífugos.....	36
2.2.5.2.	Ventilador axial	36
2.2.6.	Ventiladores según su clasificación	36
2.2.6.1.	Ventiladores principales	36
2.2.6.2.	Ventiladores secundarios	37
2.2.6.3.	Ventiladores auxiliares	37
2.2.7.	Curva de un ventilador	37
2.2.8.	Requerimiento de aire según normativa peruana	38
2.2.8.1.	Caudal requerido por el número de trabajadores (Q _{Tr}).....	38



2.2.8.2. Caudal requerido por el consumo de madera (Q_{Ma})	39
2.2.8.3. Caudal requerido por temperatura (Q_{Te}).....	40
2.2.8.4. Caudal requerido por consumos de explosivos (Q_{Ex})	41
2.2.8.5. Caudal requerido por fugas (Q_{Fu})	41
2.2.8.6. Caudal total (Q_{To})	42
2.2.9. Software utilizado para el diseño	42
2.2.9.1. Ventsim Design	42
2.2.9.2. Parámetros de entrada de modelo	43

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN	46
3.2. ACCESIBILIDAD	46
3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	47
3.3.1. Tipo de investigación	47
3.3.2. Diseño de investigación	47
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRAS	48
3.4.1. Población.....	48
3.4.2. Muestra.....	48
3.4.3. Muestreo.....	48
3.4.4. Análisis estadístico.....	49
3.4.5. Recolección de datos.....	49
3.4.5.1. Método del Anemómetro.....	49
3.4.5.2. Análisis	49
3.4.6. Análisis comparativo.....	50
3.4.6.1. Análisis documental.....	50



3.4.7. Materiales y equipos.....	50
3.4.7.1. Materiales de campo	50
3.4.7.2. Equipos de campo.....	51

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS.....	52
4.2. EVALUAR EL SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL	52
4.2.1. Evaluación de parámetros de ventilación.....	52
4.2.1.1. Análisis de velocidad de aire, temperatura y humedad	53
4.2.2. Sistema de ventilación actual	57
4.2.3. Cálculo de caudal de aire requerido para mina	58
4.2.3.1. Cálculo de caudal de aire requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr}).....	58
4.2.3.2. Cálculo de caudal de aire requerido por consumo de madera (Q_{Ma})	59
4.2.3.3. Cálculo de caudal requerido por temperatura (Q_{Te}).....	60
4.2.3.4. Cálculo de caudal requerido por fugas (Q_{Fu}).....	61
4.2.3.5. Cálculo de caudal requerido por consumos de explosivos (Q_{Ex})	62
4.2.3.6. Caudal requerido total.....	63
4.2.4. Balance de aire actual.....	63
4.2.5. Cobertura y déficit actual	64
4.2.6. Recirculación de aire en el sistema de ventilación actual	65
4.3. REDISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DE RECIRCULACION DE AIRE.	66



4.3.1. Rediseño de la primera etapa del sistema de ventilación	66
4.3.2. Rediseño de la segunda etapa del sistema de ventilación	67
4.3.3. Selección de ventiladores	69
4.3.4. Control de recirculación mediante el rediseño	70
4.4. CONTROL DE LA RECIRCULACIÓN DE AIRE A PARTIR DEL BALANCE	70
4.4.1. Balance de aire simulado con el rediseño	71
4.4.2. Cobertura y déficit simulado con el rediseño	72
4.4.3. Análisis comparativo del balance de aire actual y simulado.....	73
4.4.4. Análisis estadístico del rediseño	74
4.4.5. Prueba de distribución de normalidad.....	74
4.4.6. Prueba estadística de significancia mediante el Test de Wilcoxon	75
4.5. DISCUSIÓN	75
V. CONCLUSIONES.....	78
VI. RECOMENDACIONES	79
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	83



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Aire en la atmosfera.	29
Tabla 2 Cantidad de aire necesario por hombre de acuerdo m.s.n.m.	39
Tabla 3 Factores de producción por consumo de madera.	40
Tabla 4 Velocidad mínima a considerar por temperatura.	41
Tabla 5 Datos ambientales utilizados en la configuración del software.	44
Tabla 6 Factores de fricción para minas metálicas utilizados en la configuración. ..	44
Tabla 7 Ruta de acceso.....	46
Tabla 8 Valores registrados en los puntos de monitoreo de ingreso y salida.	53
Tabla 9 Valores registrados en los puntos de monitoreo de las labores mineras.....	55
Tabla 10 Cálculo de caudal requerido por el número de personas.	58
Tabla 11 Consumo de madera por mes.	59
Tabla 12 Cálculo de caudal requerido por consumo de madera.	60
Tabla 13 Cálculo de caudal requerido por temperatura.	61
Tabla 14 Cálculo de caudal requerido por fugas.....	61
Tabla 15 Cálculo de caudal requerido por consumos de explosivos.	62
Tabla 16 Comparación de caudales de aire obtenidos.	63
Tabla 17 Balance de aire de ingreso y salida del sistema de ventilación actual.	64
Tabla 18 Cálculo de cobertura y déficit actual.....	64
Tabla 19 Características de los ventiladores incorporados en la simulación.	69
Tabla 20 Simulación de balance de aire de ingreso y salida del rediseño.	71
Tabla 21 Simulación de balance de aire de ingreso y salida del rediseño.	71
Tabla 22 Simulación balance de caudal de cobertura y déficit o superávit.	72



Tabla 23	Prueba de normalidad con SPSS.....	74
Tabla 24	Estadístico de prueba con SPSS.....	75



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ventilación natural.....	32
Figura 2 Esquema del sistema impelente.	33
Figura 3 Esquema del sistema aspirante.....	34
Figura 4 Esquema del sistema combinado.	35
Figura 5 Curva característica de un ventilador.....	38
Figura 6 Valores de velocidad registradas, ingresos y salida de aire.	54
Figura 7 Valores de velocidad registradas en los monitoreos de labores mineras	56
Figura 8 Balance de aire actual de ingreso y salida / simulado.....	73



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Plano de ubicación de la U.M. Las Águilas.....	83
Anexo 2 Matriz de consistencia.....	84
Anexo 3 Registro de monitoreos en campo.....	85
Anexo 4 Ingreso y salida de aire del sistema de ventilación actual.....	87
Anexo 5 Recirculación de aire en el sistema de ventilación actual.....	87
Anexo 6 Diagrama de ingreso y salida de aire del sistema de ventilación actual.	89
Anexo 7 Recirculación de aire en el sistema de ventilación rediseñado.	90
Anexo 8 Diagrama de ingreso y salida de aire del sistema de ventilación rediseñado.	91
Anexo 9 Rediseño simulación del sistema de ventilación.....	92
Anexo 10 Modelamiento y simulación del by pass 050 y chimenea 017.....	93
Anexo 11 Modelamiento y simulación del tajeo 990 S – N.....	94
Anexo 12 Modelamiento y simulación del tajeo 034.	95
Anexo 13 Modelamiento y simulación del tajeo 060 S – N.....	96
Anexo 14 Modelamiento y simulación del tajeo 028.	97
Anexo 15 Plano isométrico del rediseño del sistema de ventilación.....	98
Anexo 16 Galería de fotos.....	99
Anexo 17 Declaración jurada de autenticidad de tesis.	101
Anexo 18 Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional.....	102



ACRÓNIMOS

cfm:	Cubic Feet per Minute
CIEMSA:	Consorcio de Ingenieros Ejecutores Mineros S.A.
D.S.:	Decreto Supremo
EM:	Energía y Minas
TWA:	Time Weighted Average (Media moderada en el tiempo)
U.M.:	Unidad Minera
O ₂ :	Oxigeno
CO:	Monóxido de carbono
CO ₂ :	Dióxido de carbono
NO ₂ :	Dióxido de nitrógeno
ppm:	Partes por millón
n:	Tamaño de muestra
N:	Tamaño de población
e:	Error permisible
p:	Probabilidad favorable
q:	Probabilidad desfavorable
Z:	Nivel de confianza
α :	Margen de error
P:	Valor de significancia
m ³ /min:	Metros cúbicos por minuto
m/min:	Metros por minuto
in.wc:	Inch of Water Column (Pulgada de Columna de Agua)
Art.:	Articulo



RESUMEN

El estudio aborda el problema de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA, generado por un diseño inadecuado del sistema de ventilación que afecta la distribución del flujo de aire. El objetivo general es determinar el rediseño del sistema de ventilación permita el control de la recirculación de aire en dichas labores. La investigación es de tipo aplicada, ya que propone una solución directa al problema identificado. Presenta un alcance descriptivo y un enfoque cuantitativo. La población es finita y se emplea un muestreo no probabilístico por incidencia. La recolección de datos se realizó en campo mediante monitoreos de velocidad de aire. Como resultado del análisis del sistema de ventilación actual, se corrobora que este presenta deficiencias significativas, evidenciándose una cobertura de solo 38 % del caudal de aire requerido y la presencia de recirculación de aire en diversas labores. Ante esta situación, se realizó el rediseño del sistema de ventilación mediante el software Ventsim, logrando un incremento significativo del caudal de ingreso hasta alcanzar 17 732 cfm, valor que permite cubrir adecuadamente la demanda de aire de la mina. Asimismo, el balance de aire del sistema rediseñado muestra un valor de 1,48 %, en contraste con el balance del sistema actual de -38 %, el cual no cumple con el rango permitido de ± 10 % establecido por la normativa. Estos resultados demuestran que el rediseño del sistema de ventilación permite controlar eficazmente la recirculación de aire. En conclusión, el rediseño del sistema de ventilación optimiza el flujo de aire y garantiza un control adecuado de la recirculación en las labores de la veta Úrsula 5.

Palabras Clave: Balance, control, rediseñar, recirculación, sistema, ventilación.



ABSTRACT

The study addresses the problem of air recirculation in the workings of the Úrsula 5 vein at the Las Águilas Mining Unit – CIEMSA, caused by an inadequate ventilation system design that adversely affects airflow distribution. The main objective is to determine how the redesign of the ventilation system enables the control of air recirculation in these workings. This research is applied in nature, as it proposes a direct solution to the identified problem. It has a descriptive scope and a quantitative approach. The population is finite, and a non-probabilistic incidence sampling method is employed. Data collection is carried out in the field through air velocity monitoring. As a result of the analysis of the current ventilation system, significant deficiencies are confirmed, evidenced by an airflow coverage of only 38% of the required air quantity and the presence of air recirculation in several mine workings. In response, the ventilation system is redesigned using Ventsim software, achieving a significant increase in intake airflow, reaching 17,732 cfm, which adequately satisfies the mine's air demand. Furthermore, the air balance of the redesigned system records a value of 1.48%, compared to -38% for the existing system, which fails to comply with the $\pm 10\%$ range established by regulations. These results demonstrate that the ventilation system redesign effectively controls air recirculation. In conclusion, the redesigned ventilation system optimizes airflow and ensures adequate control of air recirculation in the workings of the Úrsula 5 vein.

Keywords: Balance, control, redesign, recirculation, system, ventilation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ventilación en una operación subterránea es un elemento fundamental para asegurar condiciones de trabajo seguras y eficientes. En la Unidad Minera Las Águilas, particularmente en las labores de la veta Úrsula 5, se ha identificado un problema de recirculación de aire que compromete el desempeño del sistema de ventilación. Los controles y monitoreos realizados evidencian un desequilibrio en el balance de aire de ingreso y salida, situación que confirma la presencia de recirculación. Este fenómeno reduce la calidad del aire disponible e incrementa la acumulación de gases nocivos, generando riesgos operativos y afectando las condiciones de seguridad dentro de la mina.

El problema se origina principalmente por las deficiencias del diseño actual del sistema de ventilación. Entre las causas identificadas se encuentra la ubicación inadecuada de una labor destinada a la salida de aire, así como la ausencia de elementos de control como puertas, bloqueos y taponos, que evitan la recirculación entre labores. A ello se suma un caudal de ingreso insuficiente, incapaz de cubrir el requerimiento real de aire. En conjunto, estos factores generan una inestabilidad en el sistema de ventilación, favoreciendo la recirculación y afectando las condiciones de operación en la mina.

Si esta situación persiste, las operaciones de la mina continuarán viéndose afectadas, generando riesgos a la salud del personal y al incumplimiento de la normativa de seguridad. Además, esta condición limita la capacidad de la empresa para desarrollar sus actividades de manera adecuada y compromete directamente la seguridad y bienestar de quienes laboran en interior mina.



Ante esta problemática, se hace necesaria la implementación de un rediseño del sistema de ventilación que permita optimizar el flujo de aire, controlar la recirculación y asegurar el funcionamiento adecuado del sistema en las labores de la veta Úrsula 5.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta general

¿Cómo es el rediseño del sistema de ventilación para el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuál es la condición actual del sistema de ventilación en relación con la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA?
- ¿Cómo es el rediseño del sistema de ventilación para la optimización del control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA?
- ¿Cuál es el balance del rediseño que demuestra el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general



El rediseño del sistema de ventilación permite el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.

1.3.2. Hipótesis específicas

- El sistema de ventilación actual permite recircular el aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.
- El rediseño del sistema de ventilación permite optimizar el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.
- El balance del rediseño nos demuestra el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Determinar el rediseño del sistema de ventilación para el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.

1.4.2. Objetivos específicos



- Evaluar el sistema de ventilación actual para la identificación de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.
- Rediseñar el sistema de ventilación para la optimización del control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.
- Demostrar con el balance del rediseño el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica por la problemática identificada en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA, donde se evidencia la presencia de recirculación de aire, situación que afecta directamente la eficiencia del sistema de ventilación, compromete las condiciones de seguridad y salud de los trabajadores.

El estudio resulta necesario debido a que el diseño actual del sistema de ventilación presenta deficiencias, tales como un inadecuado balance de aire, insuficiente caudal de ingreso y una deficiente dirección del flujo, lo que genera recirculación de aire en diversas labores. Frente a esta situación, se plantea el rediseño del sistema de ventilación como una alternativa técnica viable para corregir estas deficiencias y lograr un control efectivo de la recirculación.

Desde el punto de vista práctico, los resultados de esta investigación permiten optimizar el sistema de ventilación y controlar la recirculación de aire, contribuyendo a



generar condiciones de trabajo más seguras, eficientes y acordes con la normativa vigente. La mejora en la circulación del aire influye positivamente en la productividad, el balance de aire dentro de un margen de $\pm 10\%$ de acuerdo a la normativa y una cobertura de aire adecuado.

Finalmente, se estima que el rediseño propuesto del sistema de ventilación beneficie directamente a la empresa CIEMSA, al área de operaciones y a todo el personal que labora en interior mina, al proporcionar una base técnica sólida para la toma de decisiones, la planificación de mejoras futuras y la gestión eficiente en las labores del sistema de ventilación en la veta Úrsula 5.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Marrufo (2023), en su estudio de investigación plantea como objetivo determinar un nuevo sistema de ventilación que optimice la dilución de gases nocivos en la mina Cruz de Oro. Su estudio se enmarca en una investigación de tipo descriptivo y aplicado, la recolección de datos se base en las velocidades de aire en las labores. Como resultado, la implementación del nuevo sistema de ventilación reduce significativamente la recirculación de aire presente en el nivel 4 460, especialmente entre la rampa Carmen, la galería 13 y la galería 12. En sus conclusiones, el autor señala que el diagnóstico inicial evidencia un caudal de ingreso de 165 175 cfm frente a un requerimiento de 178 629 cfm, obteniendo una cobertura del 92,5 %, valor inferior al 100 % requerido para asegurar condiciones adecuadas de ventilación.

Velazco (2022), en su investigación, plantea como objetivo rediseñar el sistema de ventilación para su optimización en minería mecanizada, partiendo del análisis de los balances de aire de ingreso. La metodología aplicada corresponde a un alcance exploratorio con enfoque experimental, sustentada en la recolección de datos mediante la medición directa de velocidades del aire. Como resultados, se presentan los balances de aire en los distintos circuitos evaluados; en el circuito 1 Margot-Farallón se registró un 2,5 %, en el circuito 2 Catuva un 6,6 %, en el circuito 3 Flor de Loto-Esperanza-Gayvo un 1 %, y en el circuito 4 Abra-Yanco un 4,8 %. El estudio concluye que es necesario rediseñar el sistema de ventilación, ya que el requerimiento total de aire es de 1 006 468 cfm, mientras que el sistema actual solo proporciona 256 235 cfm, evidenciándose un



déficit del -75 %. Es necesario actualizar el balance de aire, incorporando todas las chimeneas y bocaminas que influyen en el sistema, y señala que la correcta implementación del nuevo circuito permite eliminar la recirculación, estableciendo rutas definidas tanto para el ingreso de aire fresco como para la evacuación del aire viciado.

Quispe (2021), plantea como objetivo mejorar el sistema de ventilación en la zona Consuelo I del nivel 2 296 mediante un nuevo diseño desarrollado con el software Ventsim Design, en la Unidad Minera Alpacay de la Compañía Minera Yanaquihua S.A.C. El estudio presenta un enfoque descriptivo con alcance correlacional, y la recolección de datos se realiza con el mapeo del flujo y caudal de aire. Como resultado, el nuevo sistema de ventilación compuesto por dos circuitos alcanza una eficiencia del 62,1 %, considerada un escenario óptimo de operación para esta zona. En conclusión, el rediseño implementado con Ventsim Design mejora la cobertura de aire fresco, corrige el déficit del 41 % y permite reactivar las labores paralizadas que requerían en conjunto 44 500 cfm de aire fresco, logrando incluso una cobertura adicional del 9,20 %.

Llacho y Vargas (2020), desarrollan una investigación cuyo objetivo es analizar un nuevo circuito integral y el balance de ventilación en la chimenea 04 Pablo, empleando para ello el mapeo del flujo de aire, así como planos isométricos, unifilares y la identificación de los puntos de ingreso y salida del aire. Su estudio se enmarca en una metodología cuantitativa y descriptiva, con un diseño no experimental, utilizando como técnicas de recolección de datos el análisis documental y la observación directa. Los resultados evidencian que, sin la construcción de la chimenea 04, la cobertura de ventilación alcanzaba únicamente el 33 %, lo que generaba un déficit de 359 483 cfm, sin embargo, tras la implementación de la chimenea 04 y la mejora en las tomas de aire exteriores, la cobertura de caudal aumentó a 102 %, generando incluso un superávit de



ventilación. Los autores concluyen que la culminación de la chimenea 04, junto con la instalación de dos ventiladores de 150 000 cfm, permitió incrementar la cobertura hasta 102 %, lo que se traduce en mejores condiciones laborales y ambientales dentro del área de estudio.

Andia (2019), plantea en su investigación el objetivo de diseñar chimeneas para optimizar la ventilación en los niveles 1 790 y 2 050 de la veta Paula. Su estudio de investigación, tiene un enfoque cuantitativo. Los resultados muestran la importancia de desarrollar el diseño de chimeneas convencionales que permiten mejorar significativamente las condiciones de ventilación en ambos niveles, alcanzando un incremento de caudal de 63 000 cfm. Concluye que la construcción de estas chimeneas mejora las condiciones ambientales en la zona Paula y permite cubrir adecuadamente el requerimiento de aire.

Mamani (2019), en su investigación plantea como objetivo evaluar las deficiencias del sistema de ventilación de la Unidad Operativa Pallancata y elaborar el estudio y diseño del sistema de ventilación, con el fin de determinar el caudal de aire necesario para lograr una ventilación adecuada. Su metodología se enmarca en un enfoque descriptivo y correlacional. Como resultado, propone que la alternativa más eficiente para mejorar el sistema de ventilación es la instalación de ventiladores de 150 000 cfm, ya que esta configuración permite alcanzar una cobertura del 101 %, obteniéndose un caudal de ingreso de 479 822 cfm y un caudal de salida de 477 651 cfm, frente a un requerimiento de 476 789 cfm. Asimismo, concluye que el sistema de ventilación original presenta deficiencias significativas, puesto que la demanda de aire es de 421 208 cfm, mientras que el suministro disponible es solo de 230 407 cfm, alcanzando apenas el 56 % del caudal requerido. Para implementar un sistema de ventilación óptimo, el autor señala la



necesidad de realizar un estudio que permita diversas alternativas de ventilación y seleccionar la más adecuada para satisfacer los requerimientos operativos.

Duran (2018), desarrolla una investigación cuyo objetivo es diseñar un sistema de ventilación adecuado para la Mina Colquijirca, con la finalidad de mejorar las condiciones ambientales del lugar de trabajo. Su estudio es de tipo descriptivo, con un enfoque cuantitativo y cualitativo, y emplea como técnicas de recolección de datos la revisión de información existente y los monitoreos directamente realizados en campo. Los resultados muestran que es importante la comunicación de las chimeneas convencionales de los tajeos con los niveles superiores, así como ejecutar dos chimeneas principales de ventilación hasta superficie, con el fin de mejorar el flujo de aire en todo el sistema. El autor concluye que la cobertura actual, equivalente al 66,43 %, evidencia una deficiencia significativa, y que para alcanzar una cobertura del 100 % es necesario establecer la comunicación entre dichas chimeneas.

Soncco (2016), desarrolla su tesis con el objetivo de determinar un nuevo sistema de ventilación que permita diluir adecuadamente los gases en la U. M. Untuca, Sandia – Puno. El estudio utiliza un diseño descriptivo y aplicado, y la recolección de datos se realiza mediante el método de barrido, técnica que permitió obtener las velocidades de aire en las labores. Como resultado, se propone un nuevo diseño del sistema de ventilación modelado con el software Ventsim Visual, en el cual se simula el subsistema I y III correspondientes a las zonas de explotación. En sus conclusiones, el autor señala que el nuevo diseño cumple con las necesidades de dilución de gases nocivos; en el subsistema I se requiere un caudal de 76 137 cfm y se obtiene una cobertura del 105,68 %, mientras que en el subsistema III el requerimiento es de 95 315 cfm, logrando una cobertura del 106,59 %.



Ccoropuna (2013), en su tesis, plantea como objetivo diseñar un circuito de ventilación que permita reducir las altas temperaturas presentes en los niveles inferiores de la veta Mercedes 2, perteneciente a la Unidad Minera San Juan de Chorunga. Su investigación emplea una metodología descriptiva y correlacional, basada en la toma de datos mediante monitoreos de velocidad del aire y temperatura en los puntos establecidos. Como resultado, se determinó que la alternativa más adecuada era construir y conectar la chimenea 7 413, destinada al desfogue de aire viciado de la zona Mercedes 2 hacia el circuito superior existente, lo que permitió disminuir la temperatura ambiental e incrementar el caudal en un 35.33 %. Se concluye que la intervención propuesta logró reducir efectivamente la temperatura y aumentar el caudal de ventilación, aunque estos resultados dependen de la correcta ejecución de labores que faciliten una circulación de aire más eficiente.

Gutiérrez (2010), desarrolla un estudio cuyo objetivo es construir un modelo de ventilación de aire para minería subterránea que permita evaluar técnica y económicamente un sistema de recirculación controlada de aire, aplicando una metodología similar a la propuesta por McPherson. El resultado muestra que la investigación aborda prácticamente los escenarios y aspectos posibles relacionados con la recirculación controlada, superando incluso los alcances planteados para el caudal de aire requerido para la mina, tanto en el sistema convencional como en la alternativa con recirculación, reduciendo de 158 975 cfm a aproximadamente 127 270 cfm, representando una disminución del 20 %. Se concluye que la recirculación controlada ofrece una oportunidad significativa de optimización, ya que permite reducir el caudal de aire de entrada. De hecho, una disminución del 20 % en el caudal de ingreso genera una reducción del 51,2 % en los costos energéticos relacionados con la inyección y extracción de aire entre superficie y el nivel de ventilación.

2.2. MARCO TEÓRICO

En esta sección, como parte del capítulo serán tomadas como bases teóricas las definiciones y conceptos referentes a los componentes influyentes en la realización de un adecuado estudio y análisis de rediseño de un sistema de ventilación que tenga influencia significativa en mejorar las condiciones ambientales en las labores de la veta Úrsula 5 de la unidad minera Las Águilas - CIEMSA.

2.2.1. Aire de la atmosfera

El aire de la atmosfera es la mezcla de diferentes gases como muestra la tabla 1. La composición de este elemento esencial de la vida está compuesta por:

Tabla 1

Aire en la atmosfera

Gas	% de Volumen
Nitrógeno (N ₂)	78.08%
Oxígeno (O ₂)	20.95%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0.03%
Argón (Ar)	0.93%
Otros gases (Helio, Kriptón, neón, etc.)	0.01%

Nota: Datos de estándar atmosférico ISO 2533

2.2.2. Aire de mina

El aire dentro de la mina experimenta modificaciones en su composición debido a la mezcla de diversos gases y vapores, los cuales se originan principalmente por los gases emitidos durante las voladuras (Yanes, 1993). El aire atmosférico al ingresar por las bocaminas y chimeneas se convierte en aire de mina, siendo denominado como aire fresco y cambiando durante el trayecto del circuito de ventilación pasando a ser un aire contaminado o viciado.



2.2.3. Gases de mina

Los gases de mina son producto por las actividades realizadas en mina las cuales son por el uso de explosivos, la combustión de equipos diésel, gases de estratos y asimismo por la respiración humana siendo estos lo siguientes:

2.2.3.1. Dióxido de carbono (CO₂)

Es un gas incoloro e inodoro, con un ligero sabor ácido, que se genera durante la descomposición de la madera, la disolución de rocas carbonatadas por aguas ácidas, el uso de explosivos y la combustión de motores diésel. De acuerdo a lo establecido por el D.S. N° 024-2016-EM del anexo 15 el límite de exposición ocupacional por el tipo TWA es de 5 000 ppm durante una jornada de 8 horas de trabajo.

2.2.3.2. Monóxido de carbono (CO)

Es un gas incoloro, sin sabor e inodoro, con baja solubilidad en agua, y constituye la principal causa de muertes en incidentes mineros. Se origina por la combustión incompleta de motores de combustión interna y por los gases liberados tras el uso de explosivos. De acuerdo a lo establecido por el D.S. N° 024-2016-EM del anexo 15 el límite de exposición ocupacional por el tipo TWA es de 25 ppm durante una jornada de 8 horas de trabajo.

2.2.3.3. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Es un gas irritante de color pardo rojizo generado por detonaciones o combustiones incompletas de explosivos, así como por los gases de



escape de motores diésel. De acuerdo al D.S. N° 024-2016-EM del anexo 15 el límite de exposición por el tipo TWA es de 3 ppm en una jornada de 8 horas de trabajo.

2.2.3.4. Metano (CH₄)

Es un gas sin color, olor ni sabor, extremadamente inflamable debido a su capacidad para generar mezclas explosivas con el aire, las detonaciones de metano han provocado numerosas fatalidades. De acuerdo al D.S. N° 024-2016-EM del anexo 15 el límite de exposición ocupacional es de 5 000 ppm en el tipo Techo C.

Los conceptos presentados en el marco teórico de dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y metano, corresponden al contenido de (Yanes, 1993).

2.2.4. Ventilación de mina

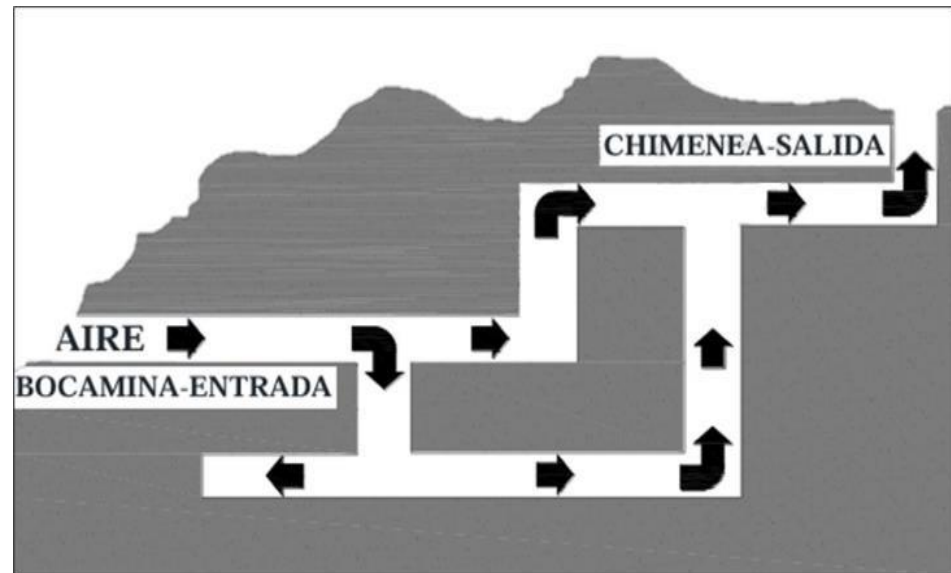
2.2.4.1. Ventilación Natural

Para que la ventilación natural funcione adecuadamente, debe haber una diferencia de niveles entre las bocaminas de ingreso y de salida como muestra la figura 1. Sin embargo, más que la profundidad de la mina, lo determinante es el intercambio termodinámico entre el exterior y el interior. El calor incorporado al sistema se convierte en energía de presión, capaz de generar movimiento de aire, ya que el aire caliente empuja al aire frío y produce la circulación. Puesto que la ventilación natural es un proceso variable y fluctuante, no debe emplearse como el único método

seguro y confiable de ventilación en ninguna operación minera subterránea.

Figura 1

Ventilación natural



Nota: Representación gráfica de un sistema de ventilación natural - Andrade (2008)

2.2.4.2. Ventilación mecánica

La ventilación mecánica se entiende como el conjunto de sistemas que, mediante el uso de ductos y ventiladores complementarios, permiten ventilar zonas específicas o de acceso limitado dentro de la mina subterránea. Estos sistemas operan utilizando circuitos destinados al suministro de aire fresco y a la extracción del aire contaminado, ambos provenientes del sistema general de ventilación.

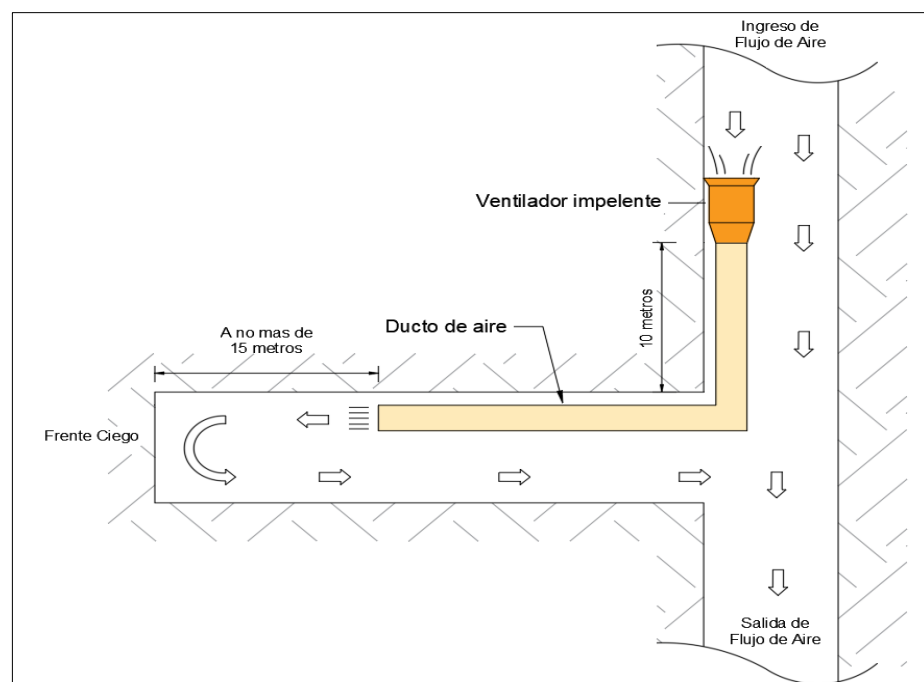
Los conceptos teóricos desarrollados en los subtítulos de ventilación natural y ventilación mecánica se basan en los planteamientos expuestos por (Andrade, 2008).

2.2.4.3. Sistema de ventilación

Sistema impelente: El ventilador genera una presión positiva constante dentro del ducto, impulsando aire fresco desde la galería principal hacia la zona de trabajo como se muestra en la figura 2. El aire contaminado se dispersa mediante el desvío del flujo de retorno, producto de la diferencia de presión originada por el ingreso del aire limpio al área de labor. El ventilador debe ubicarse a 10 metros de la intersección para evitar la recaptación del aire e impedir su recirculación dentro del sistema.

Figura 2

Esquema del sistema impelente



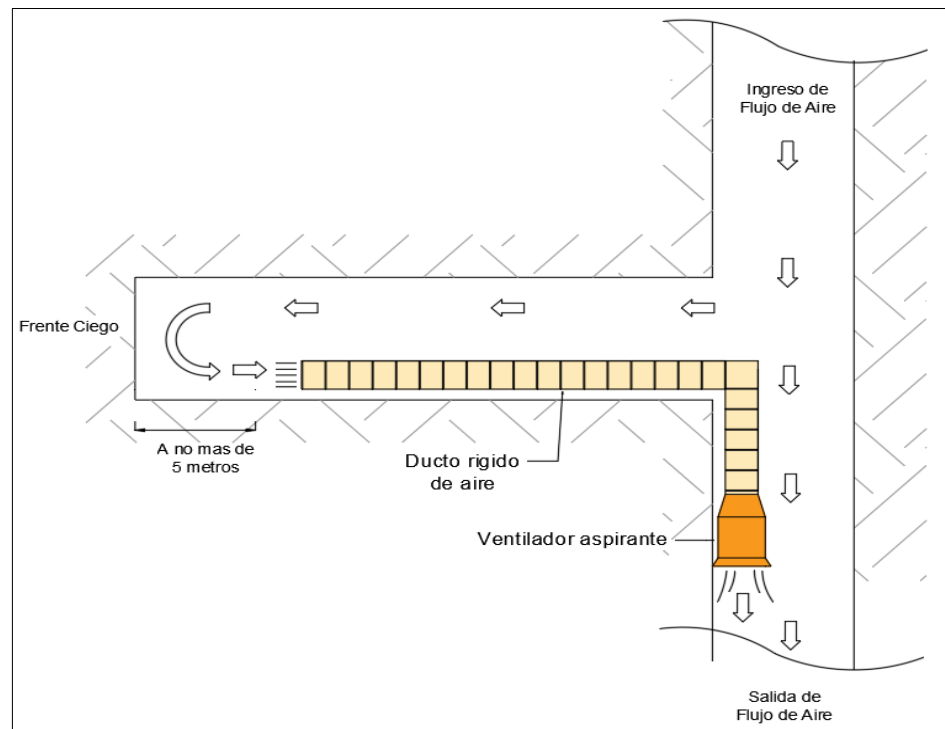
Nota: El ventilador capta el aire y mediante una manga, lo dirige al frente de trabajo la cual no debe ubicarse a más de 15 metros. - Workplace Safety North (2013)

Sistema aspirante: Este método empleado en la ventilación auxiliar utiliza un ventilador de extracción junto con ductos rígidos o reforzados con espiral, ver figura 3. El aire contaminado del frente ciego es retirado por un ventilador aspirante, que lo conduce a través del ducto instalado

hasta la galería principal, donde finalmente es descargado o evacuado hacia el exterior.

Figura 3

Esquema del sistema aspirante

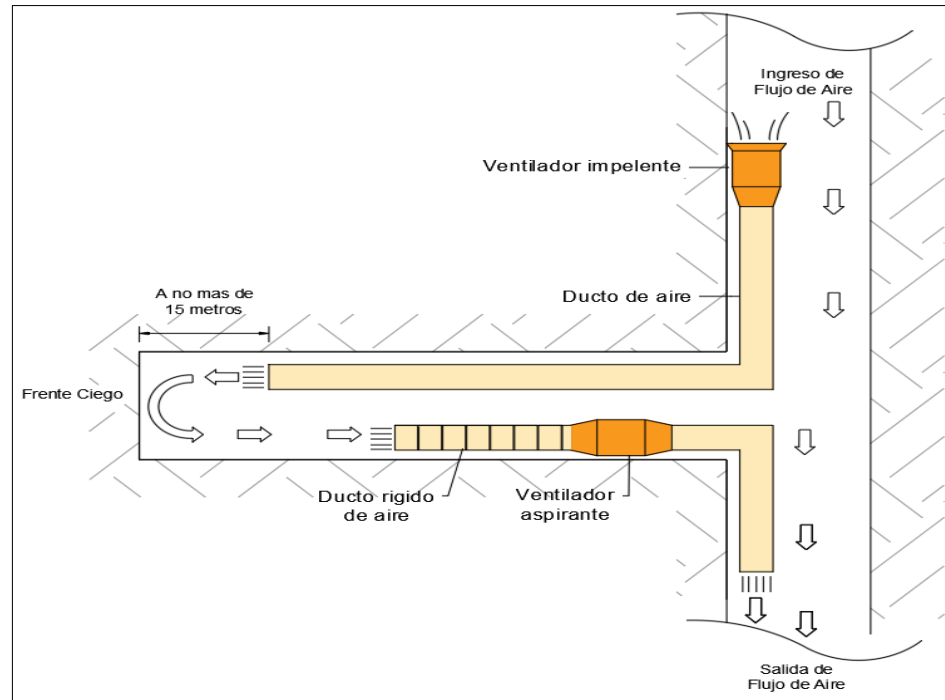


Nota: El ventilador capta el aire a través de una manga rígida ubicada a una distancia no mayor a 5 metros del frente de trabajo - Workplace Safety North (2013)

Sistema combinado: Este método combina las funciones de los sistemas impelente y aspirante, y se emplea especialmente en galerías ciegas de gran longitud, como muestra la figura 4. Se ubica un ventilador en la galería principal, donde existe una ventilación adecuada, para impulsar aire fresco a través del ducto hacia la zona de trabajo. Además, se instala un ducto junto con un ventilador extractor a lo largo de la galería en desarrollo, con el propósito de capturar y retirar el aire de retorno.

Figura 4

Esquema del sistema combinado



Nota: En el sistema combinado se utilizan dos ventiladores, uno impelente y otro aspirante, en este caso, se prescinde del uso de cortina, ya que la aspiración se realiza mediante una manga rígida. - Workplace Safety North (2013)

Los conceptos del marco teórico redactados con el sistema de ventilación, específicamente los sistemas impelente, aspirante y combinado, se fundamentan en lo mencionado por (Hurtado, 2019).

2.2.5. Ventiladores

Un ventilador es una máquina rotativa que transfiere energía al aire, creando una diferencia de presión capaz de producir un flujo constante. En minería estos equipos tienen la función de desplazar el aire por las galerías para asegurar condiciones apropiadas de trabajo tanto para el personal como para la maquinaria, aportando refrigeración, renovación del aire y control del polvo. Por lo general, estos dispositivos operan mediante un motor eléctrico.

2.2.5.1. Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos impulsan el aire hacia afuera en dirección radial, modificando su trayectoria usualmente en un ángulo de 90°. Se distinguen por producir presiones elevadas, aunque mueven un volumen de aire menor en comparación con los ventiladores axiales.

2.2.5.2. Ventilador axial

Los ventiladores axiales están contruidos para desplazar el aire en dirección paralela al eje del rotor, es decir, de manera axial. Funcionan mediante un rotor equipado con un número variable de álabes, los cuales pueden presentar un ángulo de inclinación fijo o ajustable. Estos álabes están unidos al cubo, que es el componente encargado de transferir la energía proveniente del eje del motor.

Los conceptos teóricos mencionados en los ventiladores, los ventiladores centrífugos y axiales, se fundamentan en lo descrito por (Hurtado, 2019).

2.2.6. Ventiladores según su clasificación

2.2.6.1. Ventiladores principales

Son ventiladores de alta potencia y gran capacidad de caudal, diseñados para suministrar aire a toda la operación a nivel general. Usualmente son equipos axiales instalados en superficie, aunque también es posible colocarlos en el interior de la mina. Pueden configurarse como un solo equipo o como varios ventiladores trabajando en paralelo, según

las necesidades de ventilación. Su funcionamiento puede darse tanto en modo de extracción como de inyección de aire.

2.2.6.2. Ventiladores secundarios

Los ventiladores secundarios generalmente son ventiladores axiales de menor tamaño que los ventiladores principales, instalados en un punto subterráneo que permita ayudar al ventilador principal a reforzar el manejo del caudal y la presión del aire. Su uso se vuelve necesario a medida que las labores mineras se profundizan y aumentan las resistencias que los ventiladores principales deben superar.

2.2.6.3. Ventiladores auxiliares

Normalmente corresponden a ventiladores axiales de dimensiones más reducidas que los principales, utilizados para impulsar el aire a través de labores extensas. Su función es complementar el control del caudal y la presión conforme las labores avanzan en profundidad.

Los conceptos teóricos mencionados referente a los ventiladores principales, secundarios y auxiliares se basan en lo propuesto por (Hurtado, 2019).

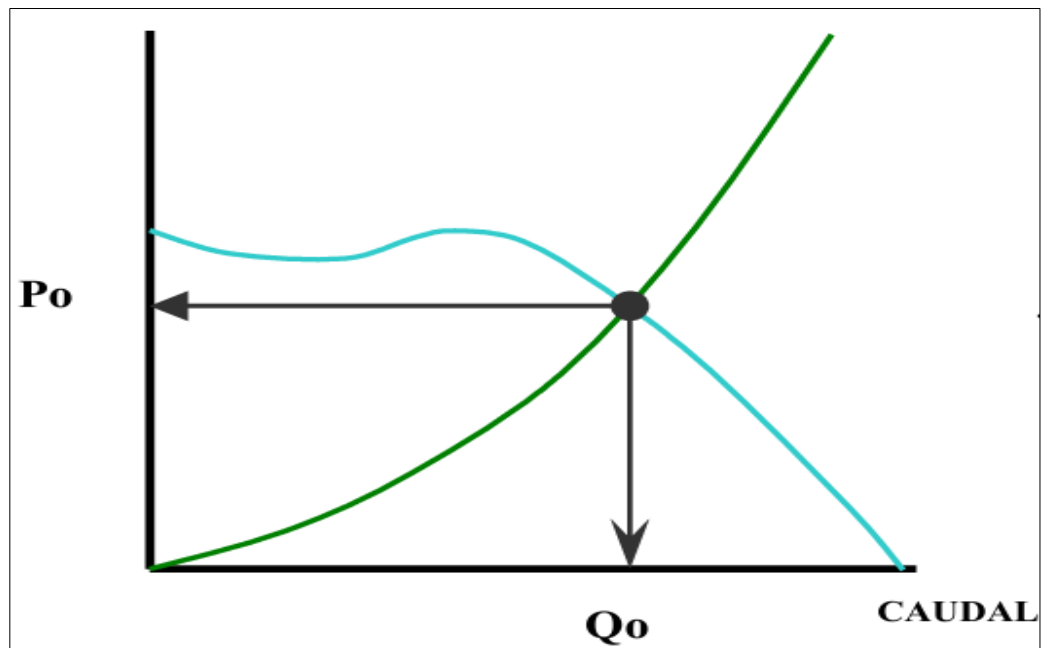
2.2.7. Curva de un ventilador

Los ventiladores se caracterizan por sus curvas de operación, las cuales representan el conjunto de puntos que describen su comportamiento durante el funcionamiento. Cada ángulo de ajuste de los álabes genera una curva diferente. La figura 5, representa el punto donde la curva característica del ventilador

intercepta con la curva de resistencia del circuito corresponde al punto de operación del ventilador (Zitrón, 2009).

Figura 5

Curva característica de un ventilador



Nota: Representación de la curva de un ventilador - Zitrón (2009)

2.2.8. Requerimiento de aire según normativa peruana

El cálculo del requerimiento de aire se efectúa conforme a lo establecido en el D.S. N.º 024-2016-EM, específicamente según lo dispuesto en el artículo 252 y en el Anexo 38.

2.2.8.1. Caudal requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr})

El caudal de aire para el personal se considera a partir de la guardia más numerosa tomándose como referencia la tabla 2, que representa el volumen de aire por persona según la altitud de la mina de acuerdo al art.

247. Asimismo, se emplea la fórmula 1 establecido en el anexo 38 de la normativa peruana.

$$Q_{Tr} = F * N \quad \dots (1)$$

Donde:

Q_{Tr} : Caudal total para número de trabajadores (m^3/min).

F : Caudal mínimo por persona de acuerdo al art. 247.

N : Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

Tabla 2

Cantidad de aire necesario por hombre de acuerdo m.s.n.m.

Altitud	Incremento %	Volumen de aire
1500 msnm		3 m^3/min
1500 a 3000 msnm	40 %	4 m^3/min
3000 a 4000 msnm	70 %	5 m^3/min
4000 msnm	100 %	6 m^3/min

Nota: Art. 247 del D.S. N° 024-2016-EM

2.2.8.2. Caudal requerido por el consumo de madera (Q_{Ma})

El caudal de aire necesario por consumo de madera se determina en función de la producción expresada en toneladas y del factor de consumo indicado en la tabla 3, de acuerdo con lo establecido en el artículo 252 literal d. Para el cálculo se aplica la fórmula 2 correspondiente al anexo 38 de la normativa peruana.

$$Q_{Ma} = T * u \quad \dots (2)$$

Donde:

Q_{Ma} : Caudal requerido por toneladas de producción (m^3/min).



u : Factor de producción, del literal d) del art 252.

T : Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

Tabla 3

Factores de producción por consumo de madera

Consumo de Madera (%)	Factor de Producción (m3/min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 70	1.25

Nota: Art. 252 del D.S. N° 024-2016-EM

2.2.8.3. Caudal requerido por temperatura (Q_{Te})

Para determinar el caudal requerido por temperatura, se toma como referencia una velocidad mínima de 20 m/min cuando las temperaturas no superan los 24 °C. En caso de exceder dicho valor, se aplica una velocidad de 30 m/min, conforme a lo estipulado en el artículo 252, literal d, tal como se presenta en la tabla 4. Para el cálculo final, se utiliza la fórmula 3 correspondiente establecida en el anexo 38 de la normativa peruana.

$$Q_{Te} = V_m * A * N \quad \dots (3)$$

Donde:

Q_{Te} : Caudal por temperatura (m3/min).

V_m : Velocidad mínima.

A : Area de la labor promedio.

N : Numero de niveles con temperatura mayor a 23 °C.

Tabla 4

Velocidad mínima a considerar por temperatura

Temperatura seca (C°)	Velocidad Mínima (m/min)
< 24	0.00
24 a 29	30.00

Nota: Art. 252 del D.S. N° 024-2016-EM

2.2.8.4. Caudal requerido por consumos de explosivos (Q_{Ex})

Para determinar el caudal de aire requerido por uso de explosivos, se toma en cuenta el área promedio de las labores, la velocidad mínima de ventilación de 20 m/min y el número de niveles en los que se ejecutan las voladuras. Finalmente, el cálculo se realiza aplicando la fórmula 4 establecida en el anexo 38 de la normativa peruana.

$$Q_{Fu} = A * V * N \quad \dots (4)$$

Donde:

Q_{Ex} : Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado (m^3/min).

A : Área promedio de labores.

V : Velocidad mínima requerida según norma.

N : Numero de niveles en voladura.

2.2.8.5. Caudal requerido por fugas (Q_{Fu})

Para el cálculo por fuga se toma la suma de los caudales anterior, y se considera el quince por ciento de este, conforme a las fórmulas 5 y 6 establecida en el anexo 38 de la normativa peruana.



$$Q_{T1} = Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te} \quad \dots (5)$$

Q_{T1} : Sumatoria de caudal requerido

$$Q_{Fu} = 15\% * Q_{T1} \quad \dots (6)$$

2.2.8.6. Caudal total (Q_{To})

El caudal total se halla con la sumatoria de caudales, más el caudal por fugas, conforme a la fórmula 7 establecida en el anexo 38 de la normativa peruana.

$$Q_{To} = Q_{T1} + Q_{Fu} \quad \dots (7)$$

El D.S. N.º 024-2016-EM en su Anexo 38 en el punto 2, establece que el caudal total de aire para la operación debe calcularse aplicando las fórmulas correspondientes y posteriormente compararse con el caudal total y caudal requerido por consumo de explosivos. Una vez obtenidos ambos valores, se debe considerar como requerimiento total de aire aquel que caudal que resulte mayor.

Los criterios expuestos en el marco teórico relacionados con el requerimiento de aire caudal requerido por número de personas, consumo de madera, temperatura, uso de explosivos, fugas y caudal total se fundamentan en lo establecido por el (D.S. N.º 024-2016-EM, 2016).

2.2.9. Software utilizado para el diseño

2.2.9.1. Ventsim Design



Ventsim ofrece un conjunto de herramientas integradas que permiten analizar el flujo de aire, la transferencia de calor, la dispersión de contaminantes y los aspectos económicos asociados a la ventilación en minería. Aunque antes los programas de simulación de ventilación podían modelar grandes redes subterráneas, la introducción de datos y la interpretación de los resultados seguían siendo tareas exclusivas de especialistas. Ventsim busca simplificar este proceso, haciendo que el diseño y la simulación de sistemas de ventilación puedan ser desarrollados por cualquier ingeniero de minas o responsable de ventilación, incluso sin amplia experiencia en el tema, el manual del usuario de VentSim, destaca que el software ofrece una amplia variedad de beneficios en los procesos de simulación (Howden, 2018).

- Realizar simulaciones y generar reportes sobre los caudales y presiones presentes en una mina en operación.
- Correr modelos con escenarios hipotéticos para evaluar futuros desarrollos proyectados.
- Contribuir en la planificación, tanto a corto como a largo plazo, de las necesidades de ventilación.
- Apoyar la selección de configuraciones adecuadas de ventiladores y circuitos de ventilación para la mina.
- Ofrece una herramienta para identificar y evaluar posibles recirculaciones de aire dentro de la mina.

2.2.9.2. Parámetros de entrada de modelo

Las configuraciones permiten gestionar numerosos parámetros empleados por Ventsim para controlar la simulación, la visualización gráfica y el manejo de archivos. Por lo general, estos ajustes se guardan asociados al archivo en el que fueron modificados, aunque también pueden ser utilizados en otros proyectos (Howden, 2018). La tabla 5, muestra datos ambientales obtenidos de informes de la empresa que permite configurar la entrar al modelo de datos en el software.

Tabla 5

Datos ambientales utilizados en la configuración del software

Ítem	Medida	Unidad
Elevación	4 330	m.s.n.m.
Temperatura del bulbo seco	15,1	°C
Temperatura del bulbo húmedo	7,34	°C
Humedad Relativa	69,93	%
Presión	57,72	kPa
Presión de vapor saturado	0,96	kPa
Presión de vapor	0,67	kPa
Densidad	0,71	Kg/m ³

Nota: Datos obtenidos de informes de la empresa

La tabla 6, presenta los factores de fricción correspondientes a labores de minas metálicas, los cuales se utilizan como parámetros de configuración dentro del software de simulación.

Tabla 6

Factores de fricción para minas metálicas utilizados en la configuración

Minas Metálicas	Factor de fricción, K kg/m³	Coefficiente de fricción, f (adimensional)
Niveles de galerías en forma de arco, pernos de roca y mallas	0,0100	0,0170
Rampas en forma de arco, pernos de roca y malla	0,0140	0,0230



Chimenea rectangular, pernos de roca y malla	0,0130	0,0220
Chimenea hecha con un raise borer	0,0050	0,0080
Ruta de faja	0,0140	0,0230
Galería perforada con TBM	0,0045	0,0075
Ductos de material colapsante (sólo para sistemas de inyección)	0,0037	0,0062

Nota: información obtenida de subsurface ventilation engineering - Mcpherson (1993)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

La investigación se realizó en la Unidad Minera Las Águilas, de propiedad de CIEMSA, ubicada en la quebrada de Lloque, paraje Koripuna, distrito de Ocuwiri, provincia de Lampa, departamento de Puno, tal como se indica en el anexo 1. Las operaciones mineras se realizan a una altitud aproximada de 4 330 m.s.n.m. en las coordenadas UTM (sistema WGS-84): Este 309 908 y Norte 8 312 041.

3.2. ACCESIBILIDAD

La tabla 7, presenta la accesibilidad hacia la U.M. Las Águilas, indicando un recorrido de 180 km desde la ciudad de Juliaca hasta la operación minera, con un tiempo estimado de viaje de 3 hrs y 10 min.

Tabla 7

Ruta de acceso

Tramos	Distancia (Km)	Tiempo	Tipo de vía
Juliaca – Ayaviri	100	1 hr y 30 min	Carretera Asfaltada
Ayaviri – Umachiri	20	20 min	Carretera Asfaltada
Umachiri – Llalli	25	35 min	Carretera Asfaltada
Llalli – U.M. Las Águilas	35	45 min	Carretera Asfaltada
Total	180	3 hrs y 10 min	



3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Tipo de investigación

Es descriptiva aplicada, ya que ofrece una solución al problema de la recirculación de aire, según su alcance se clasifica como descriptiva porque busca caracterizar el comportamiento actual del sistema de ventilación. Para ello, se evaluó el balance de aire, recirculación de aire y distribución de caudales. Esto permite reconocer las deficiencias del sistema de ventilación y se plantea un rediseño que ayude en el control en la recirculación de aire, sin manipular deliberadamente las variables.

Según su enfoque es cuantitativo se justifica porque el estudio se apoya en la recolección de datos y análisis de datos numéricos. En conjunto, este enfoque hace posible comprender con claridad el estado actual del sistema de ventilación y evaluar con respaldo numérico.

3.3.2. Diseño de investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño de investigación no experimental de tipo transversal, en el cual las variables no fueron manipuladas sino analizadas tal como se manifestaron en las condiciones reales de operación, al ser transversal los datos se realizó en un único periodo de tiempo, permitiendo caracterizar el comportamiento del sistema de ventilación existente y compararlo con los resultados de la simulación del rediseño propuesto en las labores de la veta Úrsula 5.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRAS

3.4.1. Población

La población de la presente investigación está constituida por las diferentes labores mineras que se encuentran en sistema de ventilación, en la cual se encuentran los circuitos de ventilación, como los ingresos y salidas de aire, los puntos de control de monitoreo en las labores de producción, avances y estaciones de trabajo, llegando a tener una población finita.

3.4.2. Muestra

Las muestras consideradas en este estudio de investigación se determinan a partir de una población finita, utilizando el cálculo del tamaño de muestra (López Roldán y Fachelli, 2015).

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad \dots (8)$$

$$n = \frac{18 * 2,05^2 * 0,8 * 0,2}{0,05^2 * (18 - 1) + 2,05^2 * 0,8 * 0,2}$$

$$n = 17$$

Para determinar el tamaño de la muestra se aplicó la fórmula 8, considerando los siguientes parámetros: tamaño de muestra n , tamaño de población $N = 18$ labores, nivel de confianza $Z = 2,05$, error permisible $e = 5 \%$, probabilidad favorable $p = 80 \%$ y probabilidad desfavorable $q = 20 \%$. Con estos valores, se obtuvo un tamaño muestral de 17 labores, las cuales fueron evaluadas para identificar las necesidades y problemáticas del sistema de ventilación.

3.4.3. Muestreo



En la investigación se aplica un muestreo no probabilístico por incidencia, ya que permite seleccionar de manera directa y deliberada las labores incluidas en el estudio. Este método se basa en elegir las unidades a las que se tiene un acceso más inmediato y práctico, facilitando la recolección de información (López y González, 2017).

3.4.4. Análisis estadístico

La presente investigación se enmarca en un enfoque de estadística inferencial cuantitativa, utilizando procedimientos no paramétricos debido a las características de la muestra. Para la selección del tipo de parámetro y la prueba de hipótesis más adecuada, se procedió a evaluar la distribución de normalidad de los datos mediante el programa estadístico SPSS.

3.4.5. Recolección de datos

Los datos recolectados se realizaron en las labores del sistema de ventilación, con ello se analiza el estado actual del sistema de ventilación y se plantea el rediseño del sistema de ventilación el cual permite el control de la recirculación del aire sobre las labores en la veta Úrsula 5.

3.4.5.1. Método del Anemómetro

Para la recolección de datos en los puntos de monitoreo se utiliza un anemómetro de sonda de hilo caliente, permitiendo monitorear la velocidad del aire en un punto determinado y así obtener un caudal de aire que fluye por las labores mineras.

3.4.5.2. Análisis



Los datos obtenidos se presentan y se procesa por medio del programa Excel, permitiendo calcular y manejar los datos, igualmente se emplea el software VentSim de ventilación para el modelamiento de nuevas labores y la simulación del circuito de ventilación.

3.4.6. Análisis comparativo

Para sincerar la investigación, se revisó la información recopilada y se analizó los datos obtenidos, comparando el balance de aire anterior con el balance simulado, los controles de gases, a fin de encontrar las mejoras para el sistema de ventilación de la mina.

3.4.6.1. Análisis documental

El análisis documental representa el inicio y la parte conclusiva del presente estudio de investigación, implica la revisión de datos obtenidos en los monitoreos de labores en el sistema de ventilación de la mina.

3.4.7. Materiales y equipos

Durante el proceso se utilizaron diferentes materiales y equipos para la obtención de datos y posterior mente analizarlos.

3.4.7.1. Materiales de campo

- Libreta de campo: Para tomar apuntes de los datos obtenidos con los equipos usados en los puntos de control y monitoreo.
- Útiles de escritorio: Los materiales de escritor (lapiceros, lapis, borradores, plumones y otros) son necesarios para la toma de dato organizarlos y posteriormente analizarlos en gabinete.



- Fichas de campo: Documentos diseñados para la toma de datos específicos y detallados durante la recolección de datos.

3.4.7.2. Equipos de campo

- Anemómetro: Equipo TESTO 405i, permite medir la velocidad del aire en los puntos de control y monitoreo de las labores mineras.
- Barómetro: Equipo TESTO 511, permite tomar datos de presión atmosférica en los puntos de control y monitoreo de las labores mineras.
- Termohigrómetro: Equipo TESTO 625, permite tomar datos de temperatura y humedad relativa en los puntos de control y monitoreo de labores mineras.
- Tubos de humo: Tubos de humo DRAGER, permite ver la dirección del flujo de aire en las labores mineral.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Los resultados de la presente investigación corresponden a un estudio no experimental, ya que se plantea el rediseño del sistema de ventilación mediante simulación desarrollada con el software VentSim, con el propósito de demostrar el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5 en la Unidad Minera Las Águilas – CIEMSA.

Los resultados se presentan conforme a los objetivos específicos, basándose en los datos recolectados en campo y los obtenidos mediante simulación, desarrollando una investigación de tipo descriptiva con enfoque cuantitativo. Este enfoque permitió, en primer lugar, evaluar la situación actual del sistema de ventilación identificando deficiencias como bajos caudales, velocidades de aire y recirculación de aire. Es por ello, se propone el rediseño del sistema de ventilación orientado al control de la recirculación de aire.

4.2. EVALUAR EL SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL

4.2.1. Evaluación de parámetros de ventilación

Se definieron y ubicaron estratégicamente los puntos de monitoreo de aire en la mina para la recolección precisa de datos en cada estación de control. De estos puntos identificados en campo se tomaron parámetros necesarios para su evaluación, los cuales permite diagnosticar, calcular y rediseñar el sistema de ventilación mediante simulaciones con el software VentSim.

4.2.1.1. Análisis de velocidad de aire, temperatura y humedad

El análisis de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad se realiza en función de los valores obtenidos durante el monitoreo de los ingresos y salida de aire, cuyos resultados se presentan en la tabla 8.

Tabla 8

Valores registrados en los puntos de monitoreo de ingresos y salidas

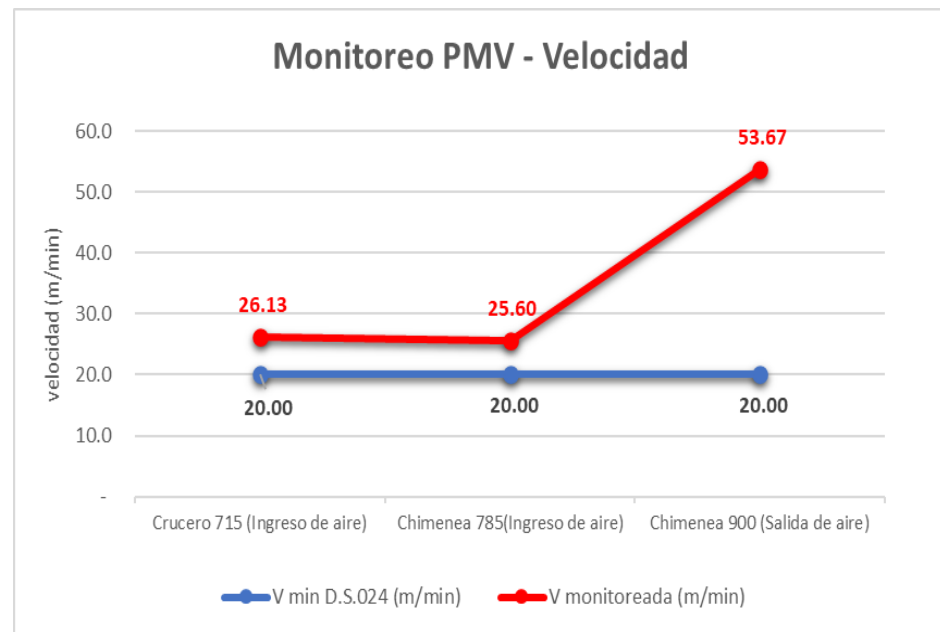
Nivel	Lugar de Medición	Velocidad (m/min)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Ingreso y salida de aire				
4330	Crucero 715 ingreso de aire	- 26,13	16,0	51,3
4330	Chimenea 785 ingreso de aire	- 25,60	16,0	51,3
4369	Chimenea 900 salida de aire	- 53,67	21,0	60,5
Promedio		35,13	17,67	54,37

La tabla 8, presenta los resultados de los monitoreos de velocidad del aire en los puntos de ingreso y salida, cuyos valores detallados se muestran en el Anexo 2. El promedio de velocidad registrado es de 35,13 m/min, lo que evidencia la existencia de flujo de aire dentro del sistema de ventilación; sin embargo, este valor no garantiza por sí solo la eficiencia del sistema ni el suministro del caudal de aire requerido para las operaciones mineras. Asimismo, los valores promedio de temperatura 17,67 °C y humedad relativa 54,37 % se encuentran dentro de rangos óptimos.

La figura 6, muestra la gráfica del análisis de la velocidad del aire correspondiente a los monitoreos de ingreso y salida del sistema de ventilación actual.

Figura 6

Valores de velocidad registradas, ingresos y salida de aire



La figura 6, muestra la comparación entre las velocidades de aire monitoreadas y la velocidad mínima exigida por el D.S. N.º 024-2016-EM. Los resultados evidencian la presencia de flujo tanto de ingreso como de salida de aire en el sistema de ventilación, asimismo, estos datos permiten realizar el cálculo del balance de aire y evaluar la cobertura de aire en el sistema de ventilación.

Los resultados de los monitoreos realizados en las labores de la veta Úrsula 5 se presentan en la tabla 9 y anexo 2; a partir de estos datos se realiza el análisis de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad

relativa, con el fin de determinar la condición actual del sistema de ventilación.

Tabla 9

Valores registrados en los puntos de monitoreo de las labores mineras

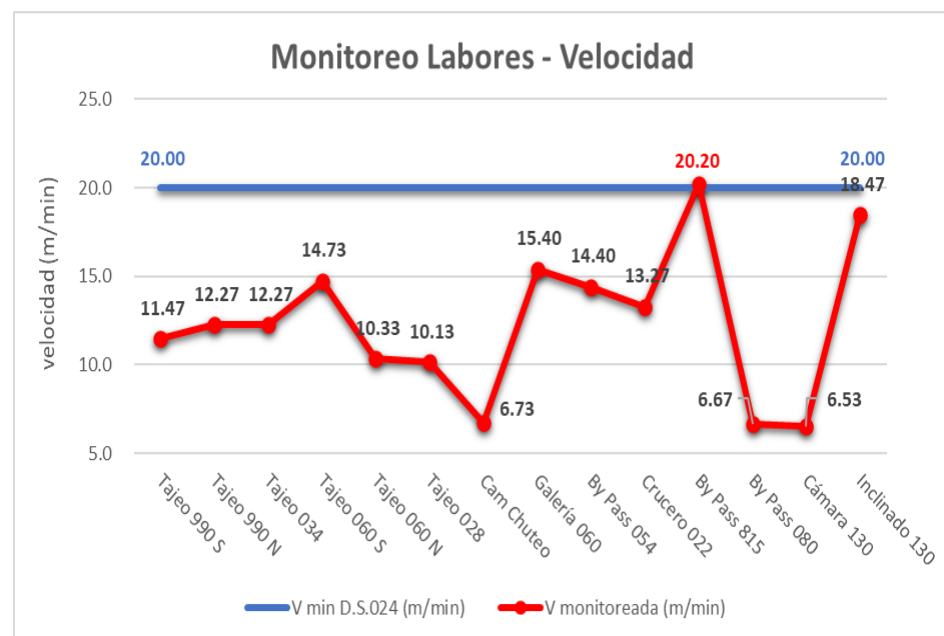
Nivel	Lugar de Medición	Velocidad (m/min)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Labores mineras				
4280	Tajeo 990 S	11,47	22,0	70,1
4280	Tajeo 990 N	12,27	22,0	70,1
4280	Tajeo 034	12,27	23,0	69,8
4280	Tajeo 060 S	14,73	23,0	68,9
4280	Tajeo 060 N	10,33	20,0	68,5
4280	Tajeo 028	10,13	21,0	67,8
4280	Cam Chuteo	6,73	16,0	68,1
4280	Galería 060	15,40	16,0	65,9
4280	By Pass 054	14,40	17,0	66,2
4280	Crucero 022	13,27	19,0	68,1
4330	By Pass 815	20,20	14,0	58,6
4330	By Pass 080	6,67	15,0	57,9
4330	Cámara 130	6,53	16,0	58,1
4330	Inclinado 130	18,47	17,0	58,3
Promedio		12,35	18,6	65,5

La tabla 9, presenta los resultados de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa. La velocidad promedio registrada es de 12,35 m/min, valor que evidencia una deficiencia respecto a las velocidades mínimas requeridas en labores mineras subterráneas. De acuerdo con la normativa vigente, la velocidad mínima del aire debe ser de 20 m/min, en este contexto, únicamente el by pass 815 cumple con dicho requisito, estos resultados se interpretan en la figura 7. En cuanto a la temperatura, se obtiene un valor promedio de 18,6 °C, el cual se encuentra dentro de los límites permisibles para trabajos subterráneos.

Respecto a la humedad relativa, se registra un promedio de 65,5 %, valor que se ubica dentro del rango recomendado de 50 % a 65 %. Sin embargo, en algunas labores se identifican valores de humedad de hasta 70 %, superando el límite superior recomendado, lo cual se asocia principalmente a las bajas velocidades de aire registradas en dichas labores.

Figura 7

Valores de velocidad registradas en los monitoreos de labores mineras



La figura 7, presenta la comparación entre las velocidades de aire monitoreadas y la velocidad mínima requerida por la normativa. Los resultados evidencian deficiencias en la mayoría de las labores evaluadas, ya que no alcanzan los 20 m/min establecidos para labores subterráneas por el D.S. N.º 024-2016-EM. Se evidencia, que únicamente el by pass 815 cumple con el valor mínimo exigido, lo que confirma la necesidad de mejorar el sistema de ventilación.



4.2.2. Sistema de ventilación actual

La configuración del sistema de ventilación actual cuenta con dos ingresos de aire y una salida de aire.

El ingreso de aire, al sistema de ventilación se realiza a través de la bocamina del crucero 715 y la chimenea 785, ambas ubicadas en el nivel 4 330, tal como se muestra en el anexo 4. El crucero 715 aporta un caudal de 3 100 cfm, mientras que la chimenea 785 contribuye con 1 302 cfm, alcanzando un caudal total de ingreso de 4 402 cfm, según se detalla en la tabla del anexo 2. Este caudal es captado por un ventilador de 10 000 cfm instalado en el by pass 815, el cual impulsa el aire a través de mangas de ventilación de 18” de diámetro hacia el inclinado 130, permitiendo el ingreso del flujo de aire al nivel 4 280, donde se desarrollan las operaciones mineras.

Salida de aire, se realiza a través de la chimenea 900 ubicada en el nivel 4 330, según se muestra en el anexo 4. No obstante, este punto de extracción presenta serias limitaciones, ya que se encuentra en una zona de labores abandonadas y con derrumbes, lo cual restringe significativamente el flujo de salida hacia la superficie. Como consecuencia, el caudal extraído alcanza 2 729 cfm, tal como se muestra en la tabla del anexo 2.

En el sistema de ventilación se identificaron la ausencia de conductos adecuados para la circulación y evacuación del aire. Esta deficiencia evidencia la recirculación en el nivel 4 280 y nivel 4 330, donde se desarrollan las operaciones de mina, a su vez, se identificaron una mala instalación de los ventiladores y el

nulo uso de bloques para un mejor direccionamiento del flujo de aire en los circuitos del sistema de ventilación.

4.2.3. Cálculo de caudal de aire requerido para mina

4.2.3.1. Cálculo de caudal de aire requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr})

Para el cálculo del caudal de aire en función del número de personas, se emplea la fórmula 1, la cual permite determinar el caudal necesario por número de trabajadores en interior mina, ver tabla 10.

$$Q_{Tr} = F * N$$

Donde “F” es el caudal de aire necesario por persona según la altitud tomando como referencia la tabla 2; dado que la unidad minera se encuentra a 4 330 msnm se considera un caudal de 6 m³/min por persona. Mientras tanto, “N” representa el número de trabajadores por guardia que ingresa a la mina, que en este caso es de 48 personas.

Tabla 10

Cálculo de caudal requerido por el número de personas

Personal	N Total/ gdia	F 4000 msnm (6 m ³ /min)	CAUDAL		Distrib (%)
			(m ³ /min)	(cfm)	
Compañía	3	6	18,0	636	6%
Contratistas	42	6	252,0	8 898	88%
Otros	3	6	18,0	636	6%
TOTAL	48	6	288,0	10 170	100%

La tabla 10, presenta el resultado del caudal de aire requerido obteniendo un valor de 10 170 cfm, necesario para atender la demanda de ventilación asociada al número de trabajadores de interior mina.

4.2.3.2. Cálculo de caudal de aire requerido por consumo de madera

(Q_{Ma})

Para determinar el caudal de aire requerido por consumo de madera, se aplica la fórmula 2, la cual permite calcular el caudal necesario en función de la cantidad de madera utilizada, ver tabla 11.

$$Q_{Ma} = T * u$$

Donde “T” corresponde a la producción en toneladas métricas húmedas por guardia, con un valor de 62,16, y “u” representa el factor de producción por consumo de madera, el cual se determina a partir de la tabla 11.

Tabla 11

Consumo de madera por mes

Registro de consumo de madera zona Úrsula						
Mes	Cons. m ³ /mes	Cons. Prog. m ³ /día	Cons. m ³ /día	Densidad eucalipto	Cons. tn/día	Cons. tn/gdia
Jul	613,08	26,67	20,44	0,58	11,81	5,91
Ago	581,56	26,67	19,39	0,58	11,20	5,60
Set	547,07	26,67	18,24	0,58	10,54	5,27
Oct	493,14	26,67	16,44	0,58	9,50	4,75
Nov	602,90	26,67	20,10	0,58	11,62	5,81
Dic	547,18	26,67	18,24	0,58	10,54	5,27
Prom.	516,55	26,67	17,22	0,58	9,95	5,43

Como resultado, la tabla 11 muestra un consumo promedio de 5,43 toneladas de madera por guardia. Al relacionar este valor con las toneladas

húmeda de producción por guardia que es 62,16 se obtiene un porcentaje de 8,74 %. Este porcentaje se evalúa con los valores de referencia presentados en la tabla 3, obteniendo un valor de 0 m³/min por el factor de producción por consumo de madera “u”.

Tabla 12

Cálculo de caudal requerido por consumo de madera

Tn Madera/Gdia	T (TMH/Gdia)	% De Madera	U	Q_{Ma} (m³/min)	(cfm)
5,43	62,16	8,74	0,00	0,00	0
TOTAL	62,16	8,01	0,00	0,00	0

La tabla 12, muestra el resultado obtenido para el cálculo del caudal de aire por consumo de madera, arrojando un valor de 0 cfm, por lo que el consumo de madera no demanda caudal adicional de ventilación.

4.2.3.3. Cálculo de caudal requerido por temperatura (Q_{Te})

Para el cálculo del caudal de aire requerido por temperatura en las labores, se emplea la fórmula 3, la cual permite determinar el flujo de aire necesario en función de las condiciones térmicas presentes, ver tabla 13.

$$Q_{Te} = V_m * A * N$$

Donde “V_m” corresponde a la velocidad mínima del aire, establecida en 20 m/min para labores cuya temperatura no supera los 24 °C, conforme a lo indicado en la tabla 4. “A” representa el área promedio de las labores, con un valor de 3,7 m²; mientras que “N” corresponde al número de niveles con temperaturas superiores a 23 °C. De acuerdo con

los resultados presentados en las tablas 8 y 9, no se registran niveles que superen dicho valor de temperatura.

Tabla 13

Cálculo de caudal requerido por temperatura

Vm (m/min)	A (m²)	N °C >24°	Q_{Te} (m³/min)	cfm
20,00	3,70	0,00	0,00	0,00
TOTAL	0,00	0,00	0,00	0,00

La tabla 13, muestra como resultado un caudal de aire requerido por temperatura de 0 cfm, lo que indica que, según las condiciones térmicas registradas en las labores, no se requiere un caudal adicional de ventilación por este criterio.

4.2.3.4. Cálculo de caudal requerido por fugas (Q_{Fu})

Para el cálculo del caudal de aire por fugas se emplean las fórmulas 5 y 6, las cuales permiten determinar el volumen de aire adicional requerido debido a las pérdidas, ver tabla 14.

$$Q_{T1} = Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te}$$

$$Q_{Fu} = 15\% * Q_{T1}$$

Tabla 14

Cálculo de caudal requerido por fugas

Q_{T1} (m³/min)	Q_{T1} (cfm)	15%	Q_{Fu} (m³/min)	Q_{Fu} (cfm)
288,00	10 169	15 %	43,20	1 525

La tabla 14, muestra el resultado obtenido donde “ Q_{TI} ” corresponde a la sumatoria de los caudales de aire requeridos, alcanzando un caudal de 10 169 cfm. Sobre este valor se le calcula el 15 %, obteniéndose un caudal de 1 525 cfm por fugas.

4.2.3.5. Cálculo de caudal requerido por consumos de explosivos (Q_{Ex})

Para el cálculo del caudal de aire por consumo de explosivos en las labores, se emplea la fórmula 4 la cual permite determinar el caudal de aire necesario en función del uso de explosivos, ver tabla 15.

$$Q_{Ex} = A * V * N$$

Donde “A” representa el área promedio de las labores, cuyo valor es de 3,7 m²; “V” corresponde a la velocidad mínima establecida por la normativa, equivalente a 20 m/min; y “N” indica el número de niveles en los que se ejecutan voladuras, siendo actualmente dos; los niveles 4 280 y 4 330.

Tabla 15

Cálculo de caudal requerido por consumos de explosivos

A (m ²)	V (m/min)	N	Q_{ex} (m ³ /min)	cfm
3,70	20,00	2,00	148,0	5 226
TOTAL			148,0	5 226

La tabla 15, muestra que el caudal de aire requerido por consumo de explosivos es 5 226 cfm, valor necesario para garantizar una adecuada ventilación durante las voladuras en la mina.

4.2.3.6. Caudal requerido total

Según lo estipulado en el anexo 38 del D.S. 024-2016-EM, cuando las operaciones no disponga de equipos diésel o petroleros, el caudal de aire debe calcularse considerando las necesidades de las operaciones y posteriormente este valor se compara con el cálculo de caudal de aire requerido por consumo de explosivos. Finalmente, se considera el mayor valor entre el caudal total requerido y el caudal requerido por consumo de explosivos como demanda de aire, ver tabla 16.

Tabla 16

Comparación de caudales de aire obtenidos

	Requerimiento	Caudal de aire	
		m ³ /min	cfm
Caudal 1	Requerimiento por personal	288,0	10 169
	Requerimiento por temperatura	0	0
	Requerimiento por consumo de madera	0	0
	Requerimiento por fugas	43,2	1 525
	Requerimiento Total	331,2	11 695
Caudal 2	Requerimiento por explosivos	148,0	5 226

Como resultado, la tabla 16 muestra que el caudal total requerido es de 11 695 cfm, mientras que el caudal requerido por consumo de explosivos alcanza 5 226 cfm. En consecuencia, se toma como caudal de aire requerido 11 695 cfm, por ser el mayor y representar la demanda máxima de aire necesaria para garantizar condiciones operativas y de seguridad adecuadas en las labores.

4.2.4. Balance de aire actual

El cálculo del balance de aire del sistema de ventilación actual se realiza a partir de los caudales de ingreso y salida, como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17

Balance de aire de ingreso y salida del sistema de ventilación actual

Lugar de medición	Caudal	
	m ³ /min	cfm
Crucero 715	87,8	3 100
Chimenea 785	36,9	1 302
Ingreso de Aire	124,7	4 402
Chimenea 900	77,3	2 729
Salida de Aire	77,3	2 729
Diferencia Ingreso y Salida de Aire	47,4	1 673
	-38 %	

La tabla 17, presenta los resultados del balance de aire de ingreso y salida. Se registra un caudal de ingreso de 4 402 cfm y un caudal de salida de 2 729 cfm, obteniéndose un balance negativo de -38 %. Este resultado evidencia que el caudal de aire evacuado es menor que el caudal de aire que ingresa, lo que confirma la presencia de recirculación dentro de la mina.

4.2.5. Cobertura y déficit actual

El cálculo de la cobertura y el superávit de aire se presenta en la tabla 18, y se realiza a partir del caudal total requerido de aire en interior mina y del caudal de ingreso de aire, cuyos valores se muestran en las tablas 16 y 17.

Tabla 18

Cálculo de cobertura y déficit actual

	m ³ /min	cfm
Caudal total requerido de aire en interior mina	331,2	11 695



Ingreso de aire limpio a interior mina	124,7	4 402
Cobertura	38%	38%
Déficit	-62%	-62%

Como resultado, la tabla 18 presenta el cálculo de la cobertura y el déficit del sistema de ventilación actual. El caudal de aire de ingreso, equivalente a 4 402 cfm, solo cubre el 38 % del requerimiento total de aire, estimado en 11 695 cfm, lo que genera un déficit del -62 %. Este resultado evidencia que el caudal de aire disponible es insuficiente y confirma la necesidad de incrementar el ingreso de aire en 7 293 cfm para satisfacer la demanda requerida en las labores mineras.

4.2.6. Recirculación de aire en el sistema de ventilación actual

Como resultado, la simulación del sistema de ventilación actual realizada con el software Ventsim permite identificar diversos puntos críticos de recirculación de aire, registrándose valores de recirculación que oscilan entre 10,2 % y 50,8 % del aire recirculado ver anexo 5, los cuales son corroborados mediante verificaciones en campo. Estos puntos corresponden al by pass 815, inclinado 130, crucero 022, chimenea 067 y galería 060, los cuales se muestran en la simulación presentada en el anexo 5 y anexo 6. Asimismo, se observa en campo que el by pass 815 se utiliza tanto para el ingreso de aire fresco como para la extracción de aire viciado, mediante un ventilador que descarga a través de una manga hacia la chimenea 900, cabe señalar que la chimenea de extracción se ubica en una zona de labores abandonadas, con presencia de derrumbes. Esta condición evidencia deficiencias significativas en el diseño actual del sistema de ventilación y explica la presencia de recirculación de aire en las labores evaluadas.

4.3. REDISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DE RECIRCULACION DE AIRE.

El rediseño del sistema de ventilación se fundamenta en el análisis del sistema actual y en las deficiencias identificadas. En este contexto, el rediseño se estructura en dos etapas. En la primera, se plantea el modelamiento de dos labores que permiten la integración de los circuitos de ventilación de la mina, con el fin de mejorar el flujo de aire. En la segunda etapa, se propone el modelamiento de las labores en los tajeos, las cuales se integran a las labores consideradas en la primera etapa, optimizando así la distribución y circulación del aire en el sistema de ventilación.

4.3.1. Rediseño de la primera etapa del sistema de ventilación

El rediseño del sistema de ventilación se basa en el modelamiento de labores orientadas a mejorar y controlar la recirculación de aire, complementado con una distribución estratégica de los ventiladores de acuerdo con las necesidades operativas de la mina ver anexo 9 y 15. Esta configuración permite optimizar la circulación del aire y establecer un sistema de ventilación eficiente en las labores.

By pass 050: El modelado y la simulación del by pass 050 muestran que esta labor permite la conexión de las chimeneas provenientes de los tajeos, funcionando como la labor principal de extracción del sistema de ventilación. En este punto se instala un ventilador de 20 000 cfm, el cual evacua el aire hacia la chimenea 017, que descarga directamente a superficie, tal como se observa en el anexo 10.

La chimenea 017: modelada y simulada, se ubica en el by pass 050 y cumple la función de evacuar el aire del sistema de ventilación hacia la superficie.



En la simulación se registra un caudal de salida de 17 994 cfm, como se muestra en el anexo 10, lo que evidencia su funcionamiento adecuado como conducto principal de descarga del aire.

4.3.2. Rediseño de la segunda etapa del sistema de ventilación

En la segunda etapa del rediseño del sistema de ventilación se realiza el modelado y la simulación de los tajeos, con el fin de evaluar y optimizar la distribución del flujo de aire en estas labores.

Tajeo 990 S – N: Como parte del rediseño del sistema de ventilación, se modela la construcción de la chimenea A1, encargada de evacuar 9 638 cfm. Esta chimenea descarga el aire hacia el nivel 4 330 a través del bypass 050, donde el ventilador de 20 000 cfm capta el flujo y lo conduce hacia la chimenea 017 para su evacuación a superficie. Asimismo, se plantea la instalación de un ventilador auxiliar de 10 000 cfm en el tajeo 990, junto con una manga de 18” de diámetro, con el fin de distribuir adecuadamente el caudal de aire y evitar que escape directamente hacia el nivel 4 330, como se muestra en el anexo 11.

Tajeo 034: Se modela la construcción de dos chimeneas ubicadas en los extremos del tajeo. Las chimeneas B1 y B2 se conectan con el by pass 050, permitiendo que el flujo sea evacuado desde el tajeo y captado por el ventilador principal de 20 000 cfm y conducido hacia la superficie a través de la chimenea 017. Los resultados de la simulación muestran que la chimenea B1 evacúa un caudal de 1 859 cfm, mientras que la chimenea B2 se bloquea en el modelado para favorecer la circulación interna del aire en el tajeo y evitar una evacuación directa.



Esta configuración puede ajustarse según las necesidades operativas, como se muestra en el anexo 12.

Tajeo 060 S – N: En el tajeo se evidencia la presencia de la chimenea 045, que evacua un caudal de 3 083 cfm; sin embargo, este flujo resulta insuficiente debido a la longitud y extensión del tajeo hacia el extremo sur. Para mejorar la evacuación del aire, se modela la construcción de la chimenea C1, la cual permite extraer un caudal de 1 178 cfm desde el tajeo 060 S, donde se simula la instalación de un ventilador neumático de 1 500 cfm, como se muestra en el anexo 13. Ambas chimeneas conducen el aire evacuado hacia el crucero 035 ubicado en el nivel 4 330, donde es captado por un ventilador de 5 000 cfm y canalizado mediante una manga hacia el by pass 050, para finalmente ser evacuado a superficie a través de la chimenea 017.

Tajeo 028: Se modela la construcción de las chimeneas D1 y D2, cuyos resultados de simulación muestran que la chimenea D1 evacúa un caudal de 1 850 cfm. La chimenea D2 opera de manera alternada según el avance del tajeo; cuando el minado se dirige hacia el sur, la evacuación del aire se realiza a través de la chimenea D1, mientras que, cuando el minado avanza hacia el norte, la evacuación se efectúa mediante la chimenea D2. Asimismo, para mejorar la fluidez del aire dentro del tajeo, se instala un ventilador neumático de 1 500 cfm como se muestra en el anexo 14. Ambas chimeneas se integran al mismo circuito de extracción del tajeo 060 S-N, donde el aire es captado por el ventilador de 5 000 cfm y conducido hacia el by pass 050, para posteriormente ser evacuado a superficie a través de la chimenea 017.

Los resultados obtenidos de la simulación evidencian una mejora significativa en el sistema de ventilación. Se observa un incremento en el caudal de aire de ingreso, registrándose en el cruce 715 un caudal de 9 676 cfm y por la chimenea 785 un caudal de 8 056 cfm, alcanzando un caudal de aire de ingreso de 17 732 cfm. En cuanto a la extracción, la chimenea 017 registra una evacuación de 17 994 cfm, lo que demuestra mejoras significativas en el sistema de ventilación. Estas mejoras son producto del accionamiento del ventilador principal de 20 000 cfm, la cual permite la circulación y evacuación del aire en todos los labores. En conjunto, el modelamiento y simulación confirma que el rediseño propuesto optimiza el flujo de aire en el sistema de ventilación.

4.3.3. Selección de ventiladores

La tabla 19, presenta las características de cada ventilador simulado en el rediseño del sistema de ventilación, mostrando su caudal, presión y potencia de motor. La selección de los ventiladores utilizados en la simulación se basa en los equipos disponibles en la unidad minera, considerando tanto los ventiladores eléctricos como los neumáticos de menor capacidad.

Tabla 19

Características de los ventiladores incorporados en la simulación

Modelo de ventilador	Caudal	Presión	Potencia motora
VAV-25 1/4-18-3450-II-A	20 000 cfm	13"H2O	75 HP
VAV-21 1/4-14-3450-I-A	10 000 cfm	4,5"H2O	15 HP
VAV-18-14-3450-II-A	5 000 cfm	7"H2O	15 HP



En la simulación se emplean los siguientes equipos mostrados en la tabla 19; un ventilador extractor de 20 000 cfm, encargado de que el caudal de aire fluya en las labores de la veta Úrsula 5 y evacuarlo hacia superficie a por la chimenea 017, ubicada en el by pass 050 del nivel 4 330; un ventilador inyector de 10 000 cfm instalado en el tajeo 990; un ventilador extractor de 5 000 cfm que capta el aire proveniente de los tajeos 060 N-S y 028; y ventiladores neumáticos de 1 500 cfm ubicados en los tajeos 060 S y 028 como muestra la distribución de ventiladores en el anexo 15. Todos estos equipos operan de manera conjunta para mejorar la distribución del caudal de aire y asegurar una eficiente extracción del aire en las labores de mina.

4.3.4. Control de recirculación mediante el rediseño

Con el rediseño del sistema de ventilación se corrobora, mediante la simulación realizada con el software Ventsim, el control efectivo de los puntos de recirculación previamente identificados en el sistema de ventilación actual. Los resultados del rediseño evidencian una recirculación de aire igual a 0 %, en contraste con los valores registrados en el sistema actual, donde la recirculación oscilaba entre 10,2 % y 50,8 %, tal como se muestra en los anexos 7 y 8. Este resultado demuestra que la nueva configuración del sistema de ventilación mejora de manera significativa la circulación del aire en los diferentes circuitos de la mina, eliminando la recirculación de aire en las labores donde anteriormente se presentaba esta problemática y garantizando un flujo de aire más eficiente y controlado.

4.4. CONTROL DE LA RECIRCULACIÓN DE AIRE A PARTIR DEL BALANCE

4.4.1. Balance de aire simulado con el rediseño

El cálculo del balance de aire del rediseñado se realiza a partir de los datos caudales obtenidos en la simulación, los cuales se presentan en la tabla 20, y los resultados del balance de aire se muestran en la tabla 21.

Tabla 20

Simulación de balance de aire de ingreso y salida del rediseño

Lugar de medición	Caudal	
	(m ³ /min)	(cfm)
Crucero 715 – ingreso de aire	274,0	9 676
Chimenea 785 – ingreso de aire	228,2	8 056
Chimenea 017 - salida de aire	509,6	17 994

Tabla 21

Simulación de balance de aire de ingreso y salida del rediseño

Lugar de medición	Caudal	
	(m ³ /min)	(cfm)
Crucero 715, Nivel 4 330	274,0	9 676
Chimenea 785, Nivel 4 330	228,2	8 056
Ingreso de Aire	502,2	17 732
Chimenea 017, Nivel 4 330	509,6	17 994
Salida de Aire	509,6	17 994
Diferencia Ingreso y Salida de Aire		1,48 %

La tabla 21, presenta los resultados de la simulación del balance de aire de ingreso y salida correspondiente al rediseño del sistema de ventilación. Se registra un caudal de ingreso de 17 732 cfm y un caudal de salida de 17 994 cfm, obteniéndose un balance de 1,48 %. De acuerdo con el D.S. N.º 024-2016-EM, el balance de aire no debe superar ± 10 %, por lo que el valor obtenido cumple con lo establecido por la normativa. Este resultado demuestra que el sistema de ventilación evacua el aire de manera eficiente y mantiene un adecuado control de la recirculación.

4.4.2. Cobertura y déficit simulado con el rediseño

El cálculo de la cobertura y el superávit de aire se presenta en la tabla 22, y se realiza a partir del caudal total requerido de aire en interior mina y del caudal de ingreso de aire, cuyos valores se muestran en las tablas 16 y 21.

Tabla 22

Simulación balance de caudal de cobertura y déficit o superávit

	m3/min	cfm
Caudal total requerido de aire en interior mina	331,2	11 695
Ingreso de aire limpio a interior mina	502,2	17 732
Cobertura	152%	152%
Superávit	52%	52%

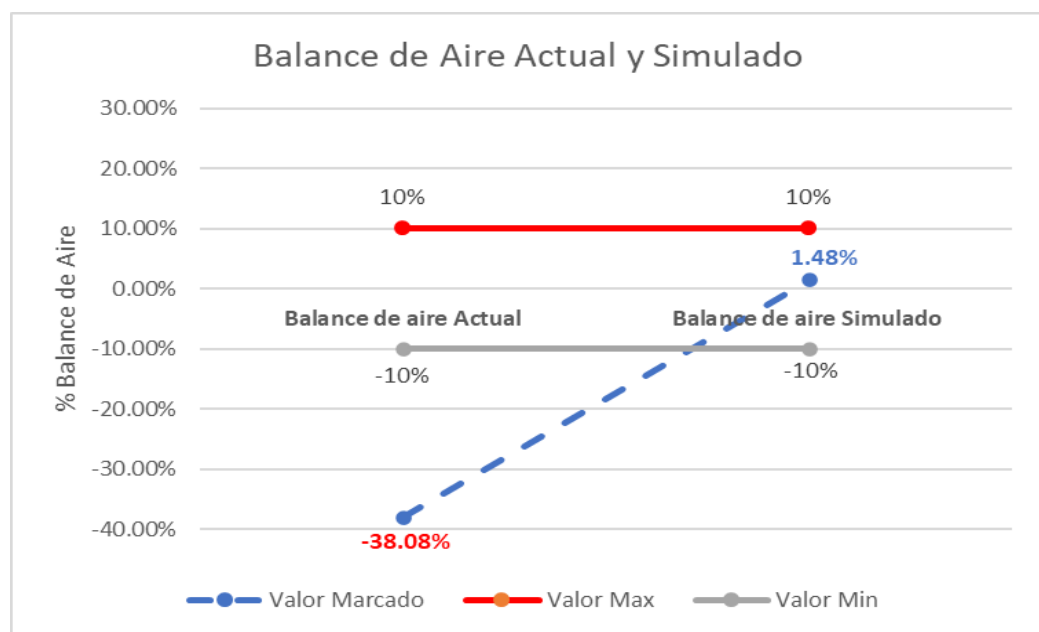
Como resultado, la tabla 22 presenta el cálculo de la cobertura y el superávit del sistema de ventilación rediseñado. El caudal de aire de ingreso alcanza 17 732 cfm, lo que permite cubrir el 152 % del requerimiento total de aire, estimado en 11 695 cfm, generando un superávit del 52 %. Este resultado evidencia que el caudal de aire suministrado no solo satisface la demanda requerida, sino que además garantiza un margen adicional de 6 036 cfm para las operaciones en el interior de la mina.

4.4.3. Análisis comparativo del balance de aire actual y simulado

El análisis comparativo se muestra en la figura 8, permitiendo contrastar los resultados del balance de aire del sistema de ventilación actual y del sistema rediseñado, a fin de evaluar las mejoras alcanzadas con el rediseño.

Figura 8

Balance de aire actual de ingreso y salida / simulado



La figura 8, muestra la diferencia significativa entre el balance de aire del sistema de ventilación actual y el balance obtenido tras el rediseño. En la condición actual, el balance entre el aire de ingreso y salida presenta un valor de -38% , lo que evidencia un desequilibrio considerable, ya que el caudal de aire evacuado es menor que el caudal de ingreso. Esta condición confirma la presencia de recirculación de aire en el interior de la mina y el incumplimiento de la normativa vigente, la cual establece un rango permitido de $\pm 10\%$. En contraste, la simulación del sistema de ventilación rediseñado registra un balance de $1,48\%$, valor que se encuentra dentro del rango normativo. Este resultado demuestra que

el rediseño del sistema de ventilación logra un balance adecuado de aire y permite controlar eficazmente la recirculación en las labores de la veta Úrsula 5.

4.4.4. Análisis estadístico del rediseño

El análisis estadístico permite validar el rediseño del sistema de ventilación mediante la aplicación de pruebas de normalidad y la prueba no paramétrica de Wilcoxon mostrados en la tabla 23 y 24, sustentando estadísticamente los resultados obtenidos.

4.4.5. Prueba de distribución de normalidad

Tabla 23

Prueba de normalidad con SPSS

Pruebas de normalidad			
Shapiro-Wilk	Estadístico	gl	Sig.
Caudales de aire ingreso y salida	0,765	3	0,034

La tabla 23, muestra el resultado de la prueba de la normalidad de los datos se realizó mediante el software SPSS, en función al caudal de ingreso y salida que determinan el balance de aire, con el objetivo de definir el tipo de parámetro y la prueba de hipótesis correspondiente. Dado que el tamaño muestral fue inferior a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de confianza del 95 % ($Z = 95\%$) y un margen de error del 5 % ($\alpha = 5\%$). El resultado arrojó un valor de significancia ($P = 0,034$) valor que se encuentra por debajo de ($P < 0,05$), lo que conduce a emplear la prueba estadística no paramétrica.

4.4.6. Prueba estadística de significancia mediante el Test de Wilcoxon

Para la aplicación de la prueba estadística se tomó como referencia el análisis de normalidad, el cual determino emplear un enfoque no paramétrica calculado con software SPSS. En este sentido, se utiliza la prueba del Test Wilcoxon la cual nos permite contrastar el planteamiento de la hipótesis estadística a partir de los datos de obtenidos en el monitoreo y simulado de los caudales de aire de ingreso y salida, con el cual se determinó el balance de aire del sistema de ventilación.

Tabla 24

Estadístico de prueba con SPSS

Estadísticos de prueba	
Caudal simulado – Caudal de rediseño	
Sig. asin. (bilateral)	0,019

La tabla 24, muestra el resultado del procesamiento de datos en SPSS aplicando la prueba de Test de Wilcoxon, con un nivel de confianza del 95 % ($Z = 95\%$) y un margen de error del 5 % ($\alpha = 5\%$). Donde sea obtenido un valor de significancia de ($P = 0,019$) valor que se encuentra por debajo de ($P < 0,05$). Esto conduce al rechazo de la hipótesis nula y a la aceptación de la hipótesis alterna, demostrando que el rediseño del sistema de ventilación garantiza el control de la recirculación de aire en las labores de la veta Úrsula 5.

4.5. DISCUSIÓN

Al evaluar el sistema de ventilación actual, se identifica que el caudal de aire de ingreso es de 4 402 cfm, mientras que el caudal requerido asciende a 11 695 cfm, a partir de estos valores, el cálculo de cobertura de aire muestra que solo se cubre el 38 % del



requerimiento total, evidenciándose un déficit del -62% , lo que confirma que el caudal de aire disponible es insuficiente para las labores mineras. En este sentido Mamani (2019), evalúa las deficiencias del sistema de ventilación de la Unidad Operativa Pallancata, donde se determina un requerimiento de aire de $421\,208\text{ cfm}$ frente a un caudal de ingreso de $230\,407\text{ cfm}$, alcanzándose únicamente una cobertura del 56% y un déficit del -44% . Estos resultados evidencian deficiencias similares en ambos sistemas de ventilación, las cuales se determinan mediante el mismo procedimiento de cálculo del requerimiento y cobertura de aire.

El rediseño del sistema de ventilación se realizó mediante el modelamiento de labores, integradas estratégicamente a los circuitos de ventilación. Este proceso se desarrolló mediante modelamiento y simulación con el software Ventsim, herramienta que permitió visualizar de manera precisa el comportamiento del aire. Con el rediseño del sistema de ventilación se evidenció una mejora sustancial en las condiciones de ingreso de aire, pasando de un caudal actual de $4\,402\text{ cfm}$ a un caudal simulado de $17\,732\text{ cfm}$, lo que representa un incremento significativo en la eficiencia del sistema de ventilación. Este nuevo caudal supera el requerimiento de aire de $11\,695\text{ cfm}$, garantizando una ventilación adecuada en las labores de la veta Úrsula 5. En este sentido, concuerdo con lo expuesto por Marrufo (2023), quien al diseñar un nuevo sistema de ventilación para la mina Cruz de Oro, destacó la utilidad de Ventsim Visual 3D como una herramienta fundamental para el diseño y optimización de sistemas de ventilación, asegurando tanto la seguridad como la productividad minera. Así mismo Andía (2019) destaca la importancia del diseño de labores convencional, las cuales permiten mejorar las condiciones de ventilación en los niveles $1\,790$ y $2\,050$ de la veta Paula al incrementar el caudal de $63\,000\text{ cfm}$ a $148\,000\text{ cfm}$, con lo que se llega a optimizar sistema de ventilación y mejorar las condiciones de trabajo, es por ello, coincido con ambos autores en la



importancia del diseño de nuevas labores, ya que estas contribuyen significativamente a mejorar el sistemas de ventilación.

En el balance de aire del sistema de ventilación actual se obtiene un valor de -38% , resultado que evidencia que el caudal de aire evacuado es menor que el caudal de aire que ingresa, confirmando la presencia de recirculación de aire en el sistema. En contraste, con el rediseño del sistema de ventilación se obtiene un balance de aire de $1,48\%$, valor que se encuentra dentro del margen permitido por la normativa vigente. Este resultado demuestra que el rediseño propuesto permite controlar la recirculación de aire y garantiza una evacuación más eficiente del flujo de aire dentro del sistema de ventilación. Asimismo, los resultados obtenidos concuerdan con los hallazgos de Laura (2018), quien, tras implementar un nuevo sistema de ventilación, mejoró el balance de aire de $-34,80\%$ a $-0,07\%$, gracias al desarrollo del crucero 2130 y la ejecución de chimeneas interconectadas entre niveles. En ese sentido, el resultado de la presente investigación coincide con el autor, evidenciando que el rediseño de ventilación constituye una medida efectiva para el control de la recirculación de aire.



V. CONCLUSIONES

- La evaluación del sistema de ventilación actual evidencia deficiencias significativas, reflejadas en bajos niveles de velocidad del aire en las labores y en una insuficiencia de caudal de aire en la mina, mostrando que el requerimiento de aire es de 11 995 cfm, mientras que el caudal de ingreso disponible es 4 402 cfm, determinando una cobertura de solo 38 % y un déficit del -62 %.
- El rediseño del sistema de ventilación se desarrolla mediante el modelamiento y la simulación en el software Ventsim, incorporando nuevas labores, la ubicación estratégica de ventiladores y la implementación de bloqueos. Esta configuración optimiza la circulación del aire y mejora el desempeño del sistema, logrando un caudal de ingreso de 17 732 cfm, lo que evidencia una mejora significativa respecto a la condición inicial del sistema de ventilación.
- El balance de aire del sistema de ventilación rediseñado evidencia un valor de 1,48 %, el cual se encuentra dentro del margen permitido por la normativa vigente, en contraste con el balance del sistema actual que es de -38 %, con ello se demuestra, que el caudal de aire de ingreso es proporcional al caudal de salida, logrando una adecuada evacuación del aire, esto confirman que el rediseño del sistema de ventilación permite controlar eficazmente la recirculación de aire.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar evaluaciones periódicas del sistema de ventilación mediante simulaciones continuas, a fin de anticipar futuras necesidades operativas y corregir oportunamente las deficiencias de caudal y velocidad de aire identificadas, garantizando así un desempeño eficiente y sostenible del sistema de ventilación a mediano y largo plazo.
- Se recomienda que futuros estudios evalúen el rediseño del sistema de ventilación utilizando otros softwares especializados, como VUMA, para modelar y simular el sistema, lo que permitirá mejorar la toma de decisiones, optimizar el control de la recirculación de aire y aumentar la eficiencia del sistema de ventilación minera.
- Se recomienda realizar estudios locales de cálculo de cobertura de ventilación, identificando zonas con déficit y superávit de aire en las labores, con la finalidad de detectar oportunamente deficiencias en los circuitos de ventilación y optimizar el control de la recirculación de aire.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andia, G. F. F. (2019). Diseño de chimeneas gemelas para mejorar la ventilación en los niveles 1790 - 2050 veta paula cia minera yanaquihua [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*].
<https://repositorio.unsa.edu.pe/items/9e4d77ae-b6bd-4da5-8ca7-6566c7792fc1>
- Andrade, G. S. (2008). Guía metodológica de seguridad para proyectos de ventilación de minas. Santiago de Chile: Emitido SERNAGEOMIN.
<https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2018/12/200812GuiaVentilacionMinas.pdf>
- Ccoropuna, C. E. J. (2013). Dinámica de fluidos para el decremento de temperaturas y diseño del circuito de ventilación en vetas mercedes 2 y San Juan de la U.E.A de San Juan de Chorunga [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3844>
- D.S. N° 024-2016-EM. (2016). Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
www.gob.pe/minem
- Duran, J. J. R. (2018). Mejoramiento de la ventilación en la mina subterránea - mina Colquijirca cia. de minas Buenaventura s.a.a. [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión*].
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/512>
- Gutiérrez, A. C. A. (2010). Recirculación Controlada en Minería Subterránea [*Tesis de pregrado, Universidad de Chile*].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103701>
- Hurtado, C. J. P. (2019). Manual Metodológico para la Ventilación de Minas. Santiago de Chile: Emitido SERNAGEOMIN.
<https://es.scribd.com/document/428469782/Manual-Methodologico-de-Ventilacion-de-Minas-1>



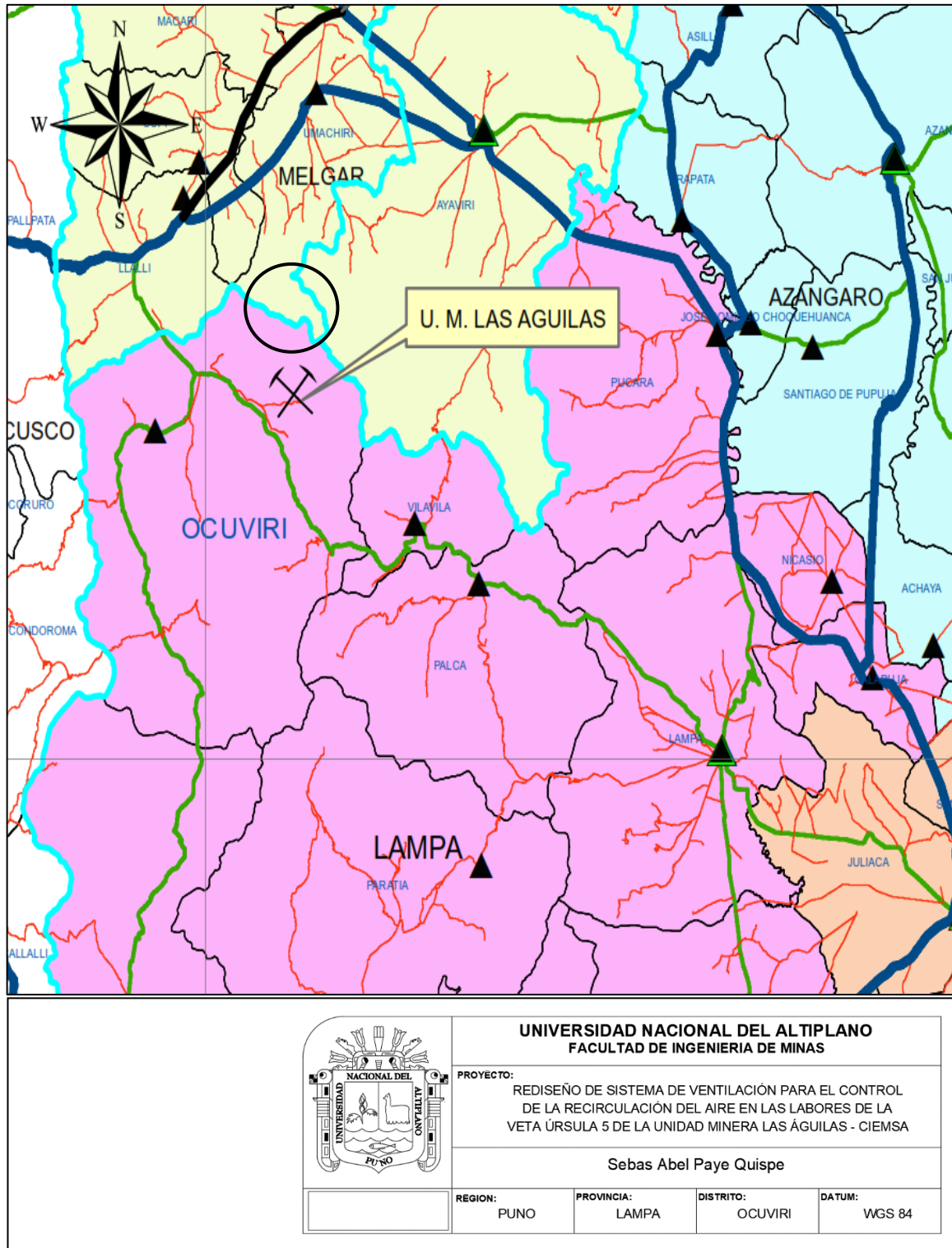
- Laura, F. J. (2018). Desarrollo del crucero 2130 para la mejora de la producción y ventilación en la mina españolita [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano Puno*].
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9893?show=full>
- Llacho, A. U. A., & Vargas, C. C. A. D. (2020). Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U.O. Pallancata – veta Pablo – 2018 [*Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú*].
<http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3417>
- López, E. y González, B. (2017). Principios de muestreo estadístico. Guatemala: Publicado por la Universidad de San Carlos de Guatemala.
<https://ia804502.us.archive.org/25/items/PrincipiosDeMuestreoEstadsticoEd.Agosto2017/Principios%20de%20muestreo%20estad%C3%ADstico%20Ed.%20Agosto%202017.pdf>
- López, R. P. y Fachelli, S. (2015). Metodología de la investigación social cuantitativa. Barcelona: Publicado por la Universidad Autónoma de Barcelona.
https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2017/185163/metinvsoccaa_cap2-4a2017.pdf
- Mamani, C. R. (2019). Estudio y diseño del sistema de ventilación de las zonas Yurika y Pablo, Hochschild mining - Unidad Operativa Pallancata 2018 [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*].
<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5111>
- Marrufo, G. J. (2023). Diseño de un nuevo sistema de ventilación para la dilución de gases nocivos en la mina cruz de oro, Puno [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*].
<https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/b998170b-8987-440e-9bd0-60d2b0ee7572>
- Mcpherson, M. J., Eng, C., Aime, M. y Ashrae, M. (1993). Subsurface Ventilation Engineering. Londres: Editorial Chapman y Hall.
<https://es.scribd.com/doc/308462249/Subsurface-Ventilation-Engineering-McPHERSON>
- Quispe, Z. W. W. (2021). Optimización del sistema de ventilación con el software Ventsim-Design en la zona Consuelo I - nivel 2296 de la Unidad Operativa Alpacay



- CIA Minera Yanaquihua S.A.C. [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano Puno*].
<https://repositorio.unap.edu.pe/items/7bff7c4e-2666-4904-ae14-d4a43b199009>
- Soncco, S. C. (2016). Diseño de un nuevo sistema de ventilación para la dilución de gases nocivos en la Unidad Minera Untuca, Sandia – Puno [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano Puno*].
<http://tesis.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/3012>
- Howden. (2018). Ventsim DESIGN® Manual del Usuario Ventsim.
<https://ventsim.com/files/VentsimManualEsp.pdf>
- Velazco, F. A. M. (2022). Rediseño del sistema de ventilación, para su optimización en minería subterránea mecanizada [*Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*].
<https://hdl.handle.net/20.500.12773/15858>
- Workplace Safety North. (2013). Auxiliary Mine Ventilation Manual. North Bay, Ontario: Editorial Workplace Safety North.
<https://es.scribd.com/document/754451746/Auxiliary-Mine-Ventilation-Manual-Cap-1-a-7>
- Yanes, G. E. (1993). Ventilación de minas. Santiago de Chile: Emitido SERNAGEOMIN.
<https://es.scribd.com/document/447342342/VENTILACION-YANES-pdf>
- Zitrón (2009). Conferencias sobre ventilación de minas. Chile: Santiago de Chile.
<https://es.scribd.com/document/382351060/CURSO-VENTILACION-ZITRON>

ANEXOS

Anexo 1. Plano de ubicación de la U.M. Las Águilas



Anexo 2. Matriz de consistencia

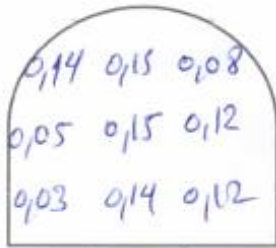
Nivel	Lugar de Medición	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	V (m/min)	Área (m ²)	Q (m ³ /min)	Q (CFM)	Temp. °C	H (%H ₂ O)
4330	Crucero 715, ingreso de aire	0.36	0.49	0.37	0.45	0.48	0.42	0.39	0.5	0.46	26.13	3.4	87.80	3,100	16.0	51.3
4330	Chimenea 785, ingreso de aire	0.38	0.51	0.38	0.43	0.41	0.51	0.37	0.42	0.43	25.60	1.5	36.86	1,302	16.0	51.3
4369	Chimenea 900, salida de aire	0.94	0.83	1.02	0.97	0.84	0.69	1.12	0.88	0.76	53.67	1.5	77.28	2,729	21.0	60.5
4280	Tajeo 990 S	0.18	0.26	0.19	0.21	0.18	0.24	0.21	0.14	0.11	11.47	6.3	71.69	2,531	22.0	70.1
4280	Tajeo 990 N	0.09	0.15	0.18	0.21	0.26	0.24	0.24	0.28	0.19	12.27	2.1	25.77	910	22.0	70.1
4280	Tajeo 034	0.09	0.15	0.18	0.21	0.26	0.24	0.24	0.28	0.19	12.27	2.1	25.77	910	23.0	69.8
4280	Tajeo 060 S	0.28	0.25	0.21	0.32	0.16	0.24	0.17	0.30	0.28	14.73	1.8	26.51	936	23.0	68.9
4280	Tajeo 060 N	0.10	0.09	0.16	0.24	0.25	0.14	0.24	0.12	0.21	10.33	1.8	18.59	657	20.0	68.5
4280	Tajeo 028	0.12	0.15	0.15	0.21	0.16	0.21	0.18	0.20	0.14	10.13	1.8	18.23	644	21.0	67.8
4280	Cam Chuteo	0.08	0.10	0.18	0.04	0.12	0.15	0.16	0.08	0.10	6.73	6.3	42.06	1,485	16.0	68.1
4280	Galería 060	0.28	0.25	0.34	0.22	0.24	0.28	0.18	0.21	0.31	15.40	4.4	67.91	2,398	16.0	65.9
4280	By Pass 054	0.24	0.26	0.28	0.23	0.18	0.25	0.28	0.16	0.28	14.40	4.4	63.50	2,242	17.0	66.2
4280	Crucero 022	0.18	0.18	0.34	0.21	0.22	0.23	0.14	0.25	0.24	13.27	4.4	58.52	2,066	19.0	68.1
4330	By Pass 815	0.31	0.35	0.38	0.33	0.33	0.28	0.34	0.36	0.35	20.20	4.4	89.08	3,145	14.0	58.6
4330	By Pass 080	0.12	0.14	0.10	0.09	0.12	0.08	0.10	0.11	0.14	6.67	4.4	29.41	1,039	15.0	57.9
4330	Cámara 130	0.14	0.15	0.08	0.05	0.15	0.12	0.03	0.14	0.12	6.53	6.3	40.81	1,441	16.0	58.1
4330	Inclinado 130	0.28	0.31	0.33	0.28	0.35	0.33	0.34	0.25	0.30	18.47	6.3	115.44	4,076	17.0	58.3

Anexo 3. Registro de monitoreos en campo

REGISTRO MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE AIRE

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Labor</td><td>Chimenea 900 Nv 4369</td></tr> <tr><td>Equipo</td><td>TESTO 4051</td></tr> <tr><td>Personas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td>salida & aire</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr><th>Presión</th><th>Temperatura</th><th>HR</th><th>Hora</th><th>Fecha</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>606.1</td><td>21</td><td>60.5</td><td>2:10pm</td><td>23/12/24</td></tr> </tbody> </table>	Labor	Chimenea 900 Nv 4369	Equipo	TESTO 4051	Personas	2	Observaciones	salida & aire	Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha	606.1	21	60.5	2:10pm	23/12/24
Labor	Chimenea 900 Nv 4369																		
Equipo	TESTO 4051																		
Personas	2																		
Observaciones	salida & aire																		
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha															
606.1	21	60.5	2:10pm	23/12/24															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Labor</td><td>Chimenea 785 Nv 4330</td></tr> <tr><td>Equipo</td><td>TESTO 4051</td></tr> <tr><td>Personas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td>proporo & aire</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr><th>Presión</th><th>Temperatura</th><th>HR</th><th>Hora</th><th>Fecha</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>605.7</td><td>16</td><td>51.3</td><td>2:38pm</td><td>23/12/24</td></tr> </tbody> </table>	Labor	Chimenea 785 Nv 4330	Equipo	TESTO 4051	Personas	2	Observaciones	proporo & aire	Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha	605.7	16	51.3	2:38pm	23/12/24
Labor	Chimenea 785 Nv 4330																		
Equipo	TESTO 4051																		
Personas	2																		
Observaciones	proporo & aire																		
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha															
605.7	16	51.3	2:38pm	23/12/24															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Labor</td><td>Chimenea 715 Nv 4330</td></tr> <tr><td>Equipo</td><td>TESTO 4051</td></tr> <tr><td>Personas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td>ingreso & aire.</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr><th>Presión</th><th>Temperatura</th><th>HR</th><th>Hora</th><th>Fecha</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>605.7</td><td>16</td><td>51.3</td><td>2:23pm</td><td>23/12/24</td></tr> </tbody> </table>	Labor	Chimenea 715 Nv 4330	Equipo	TESTO 4051	Personas	2	Observaciones	ingreso & aire.	Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha	605.7	16	51.3	2:23pm	23/12/24
Labor	Chimenea 715 Nv 4330																		
Equipo	TESTO 4051																		
Personas	2																		
Observaciones	ingreso & aire.																		
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha															
605.7	16	51.3	2:23pm	23/12/24															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Labor</td><td>By Pass 915 Nv 4330</td></tr> <tr><td>Equipo</td><td>TESTO 4051</td></tr> <tr><td>Personas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td></td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr><th>Presión</th><th>Temperatura</th><th>HR</th><th>Hora</th><th>Fecha</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>605.7</td><td>14</td><td>58.6</td><td>2:41pm</td><td>23/12/24</td></tr> </tbody> </table>	Labor	By Pass 915 Nv 4330	Equipo	TESTO 4051	Personas	2	Observaciones		Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha	605.7	14	58.6	2:41pm	23/12/24
Labor	By Pass 915 Nv 4330																		
Equipo	TESTO 4051																		
Personas	2																		
Observaciones																			
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha															
605.7	14	58.6	2:41pm	23/12/24															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Labor</td><td>By Pass 020 Nv 4320</td></tr> <tr><td>Equipo</td><td>TESTO 4051</td></tr> <tr><td>Personas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td></td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr><th>Presión</th><th>Temperatura</th><th>HR</th><th>Hora</th><th>Fecha</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>605.7</td><td>15</td><td>57.9</td><td>3:00pm</td><td>23/12/24</td></tr> </tbody> </table>	Labor	By Pass 020 Nv 4320	Equipo	TESTO 4051	Personas	2	Observaciones		Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha	605.7	15	57.9	3:00pm	23/12/24
Labor	By Pass 020 Nv 4320																		
Equipo	TESTO 4051																		
Personas	2																		
Observaciones																			
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha															
605.7	15	57.9	3:00pm	23/12/24															

REGISTRO MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE AIRE

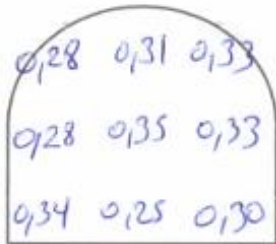


2,5

2,5

Labor	Camara 130 N4 4330
Equipo	anemometro TESTO 4051
Personas	2
Observaciones	

Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha
605.4	16	58.1	9:05am	23/12/24

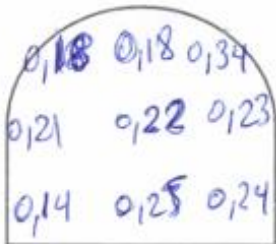


2,5

2,5

Labor	Inclinado 130 N4 4330
Equipo	TESTO 4051
Personas	2
Observaciones	

Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha
605.5	17	58.3	9:17am	23/12/24



2,1

2,1

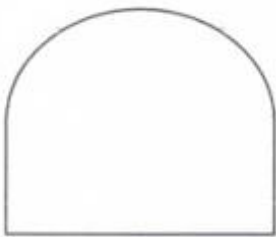
Labor	Cruce 022 N4 4280
Equipo	TESTO 4051
Personas	2
Observaciones	

Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha
602.4	19	68.1	10:34am	23/12/24



Labor	
Equipo	
Personas	
Observaciones	

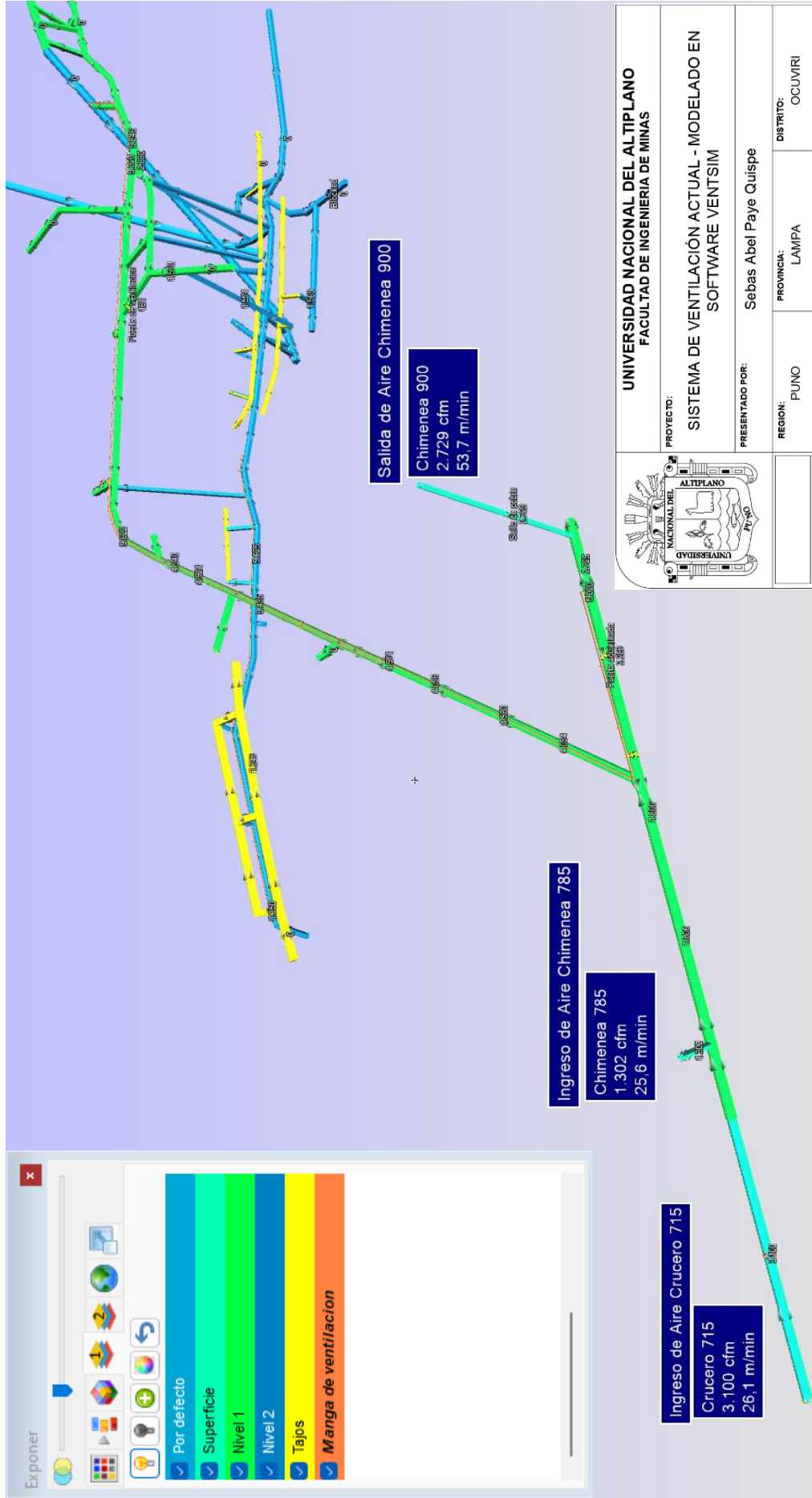
Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha



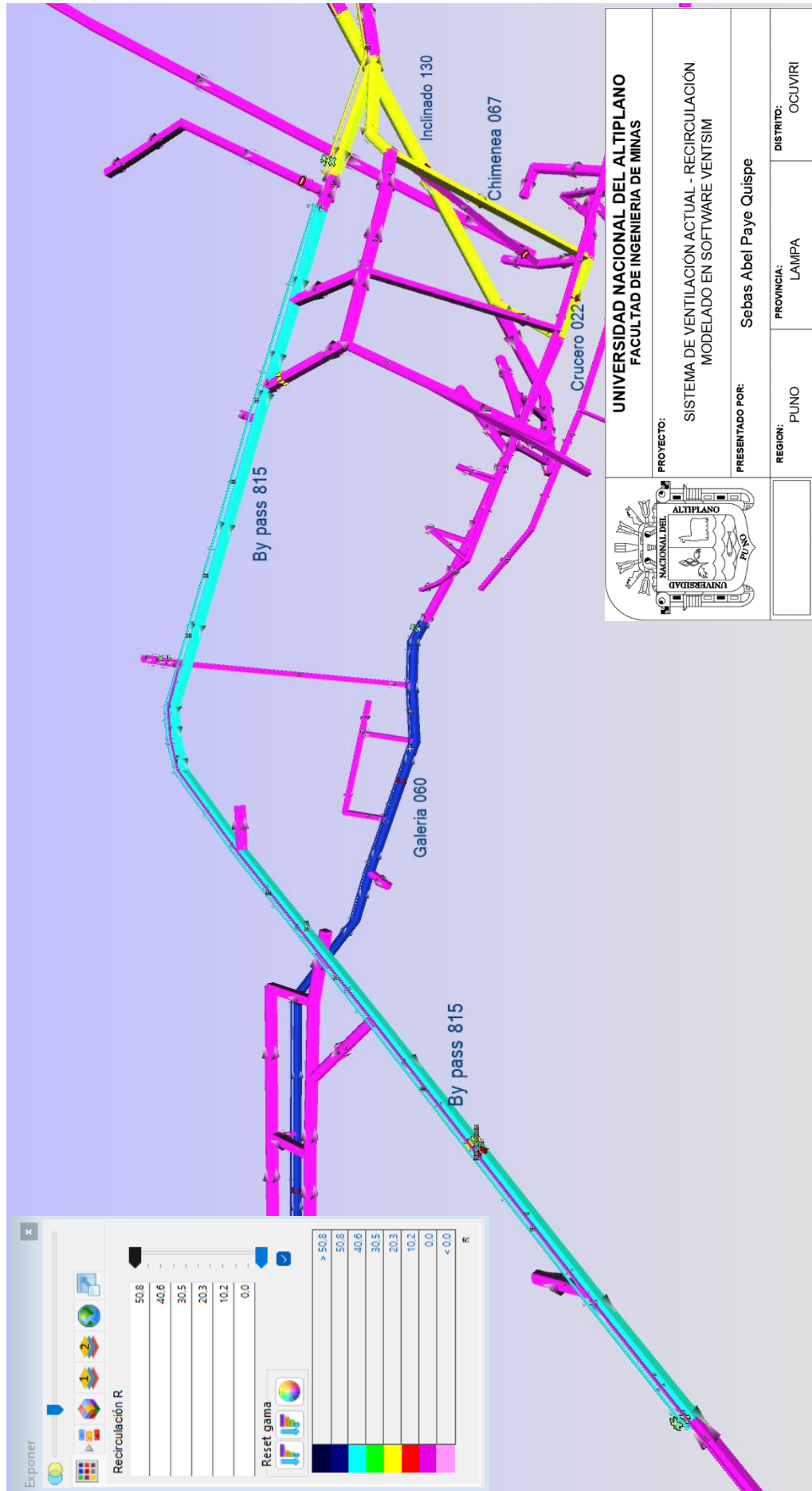
Labor	
Equipo	
Personas	
Observaciones	

Presión	Temperatura	HR	Hora	Fecha

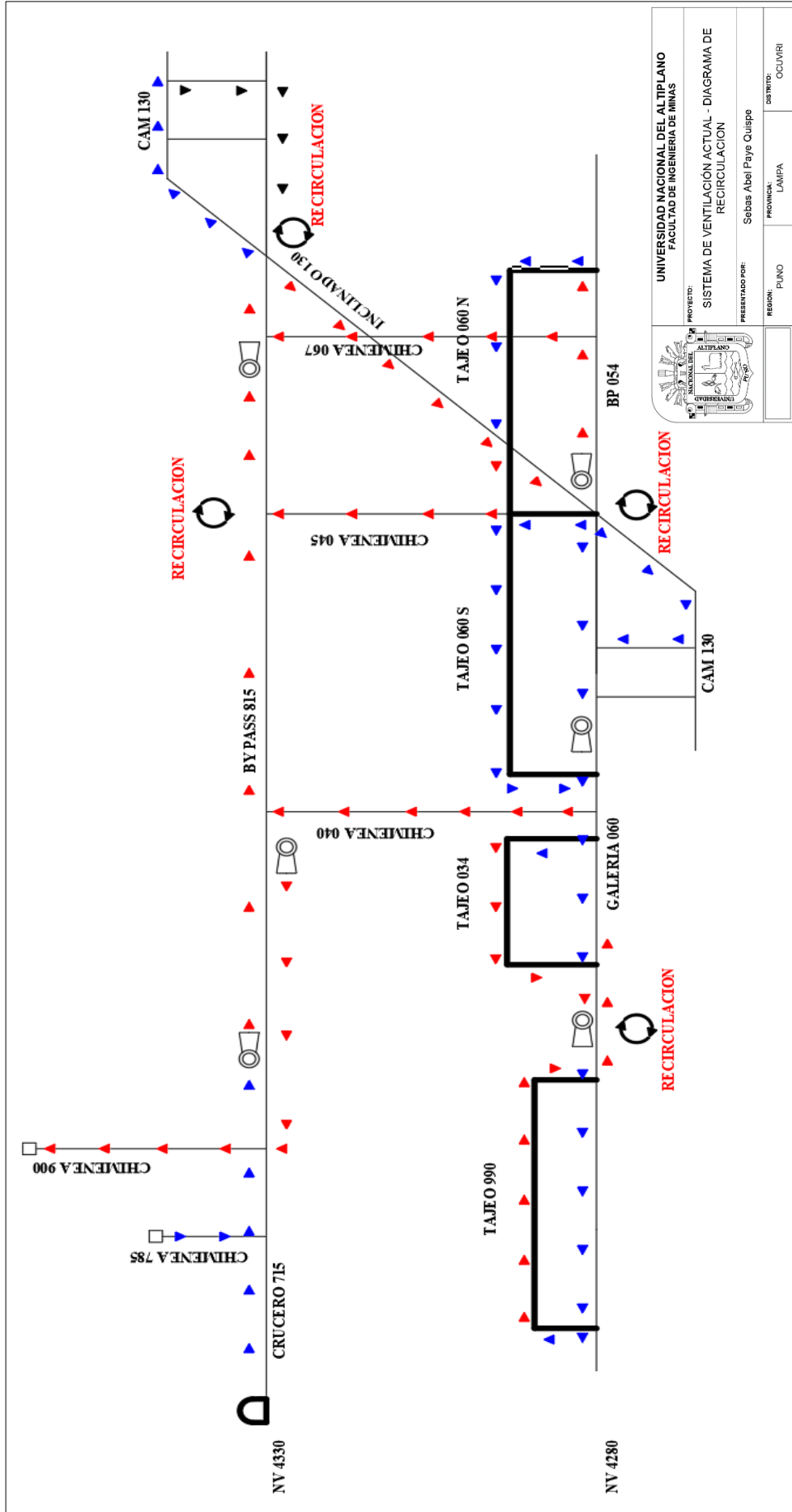
Anexo 4. Ingreso y salida de aire del sistema de ventilación actual



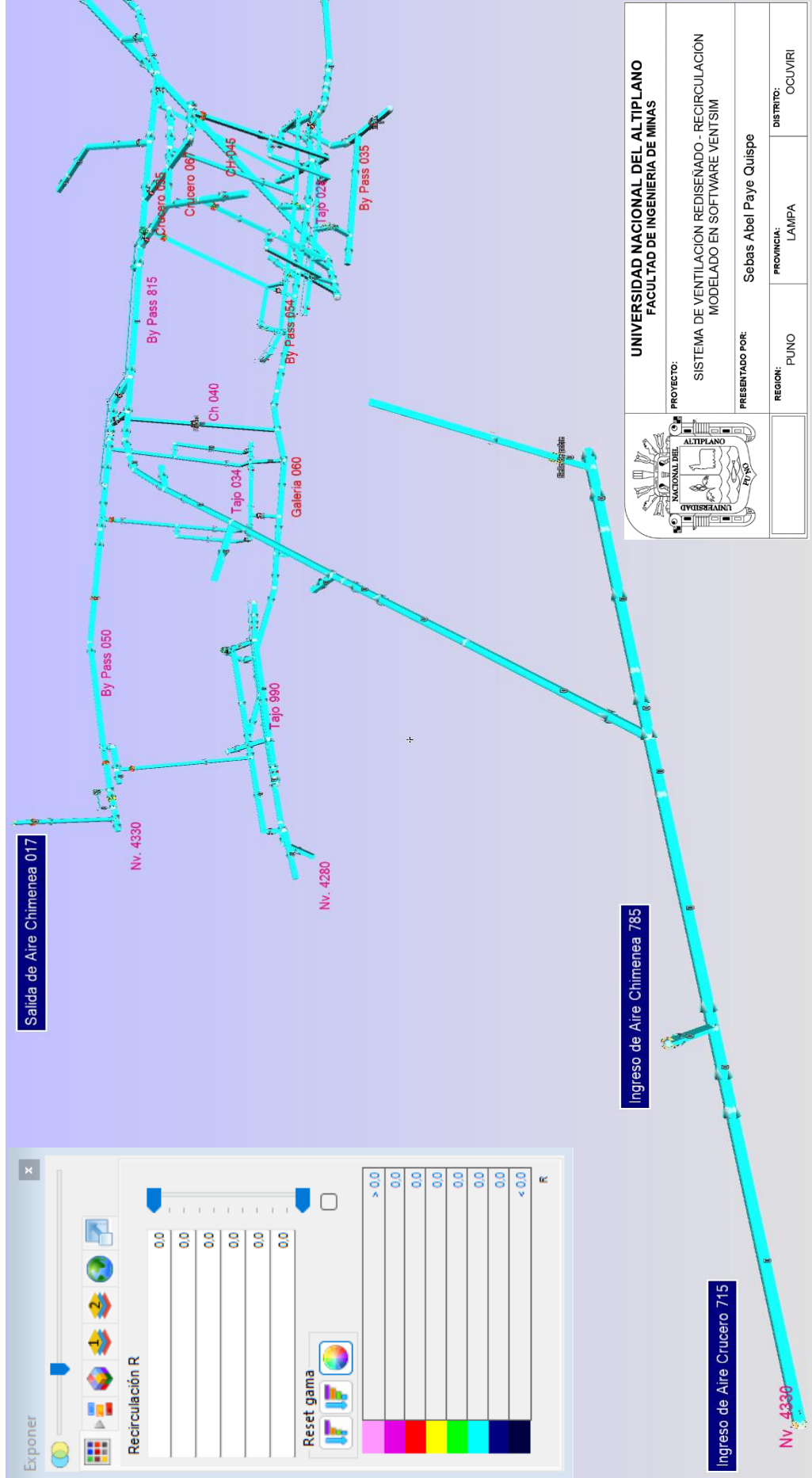
Anexo 5. Recirculación de aire en el sistema de ventilación actual



Anexo 6. Diagrama de ingreso y salida de aire del sistema de ventilación actual

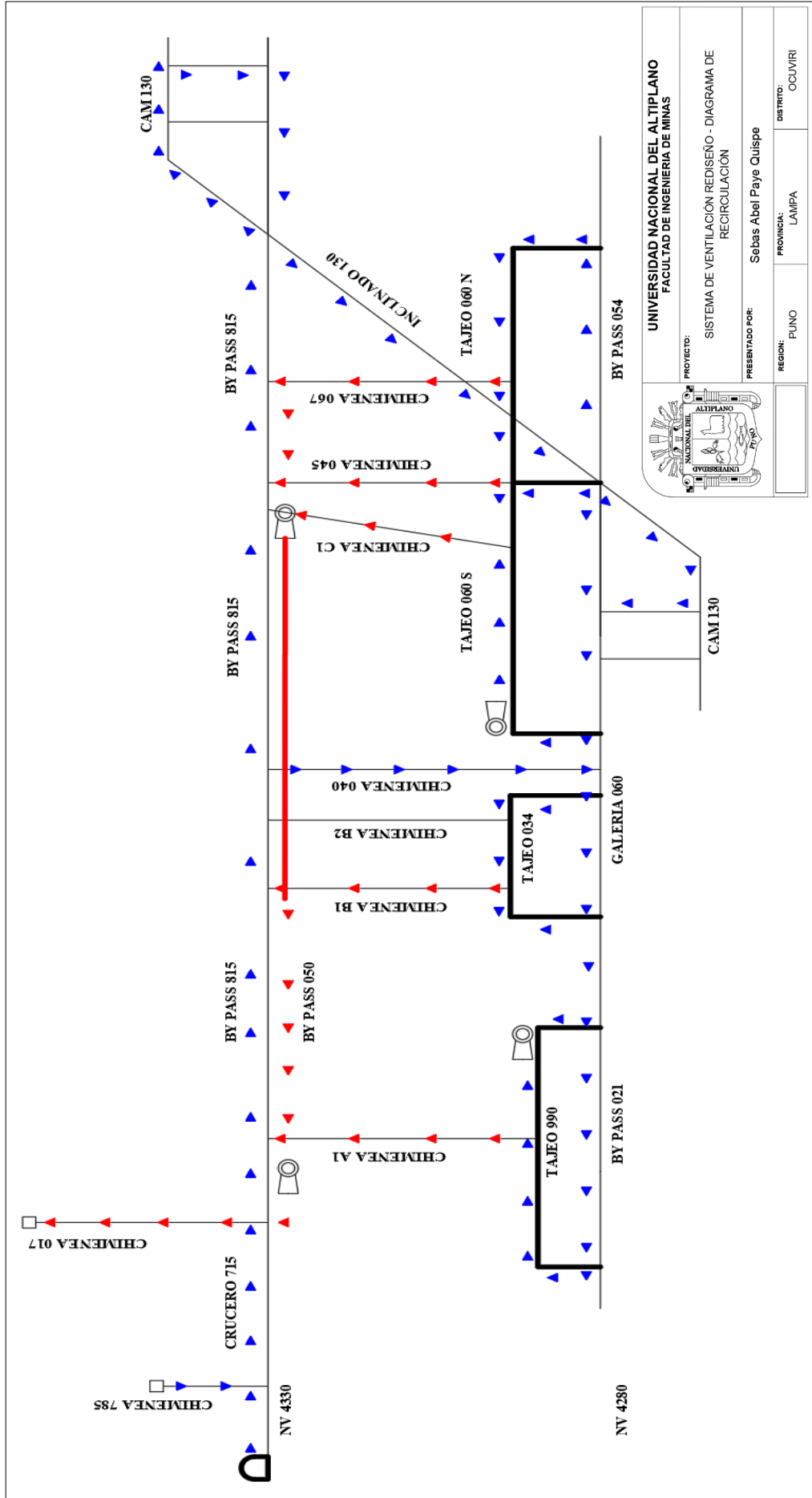


Anexo 7. Recirculación de aire en el sistema de ventilación rediseñado

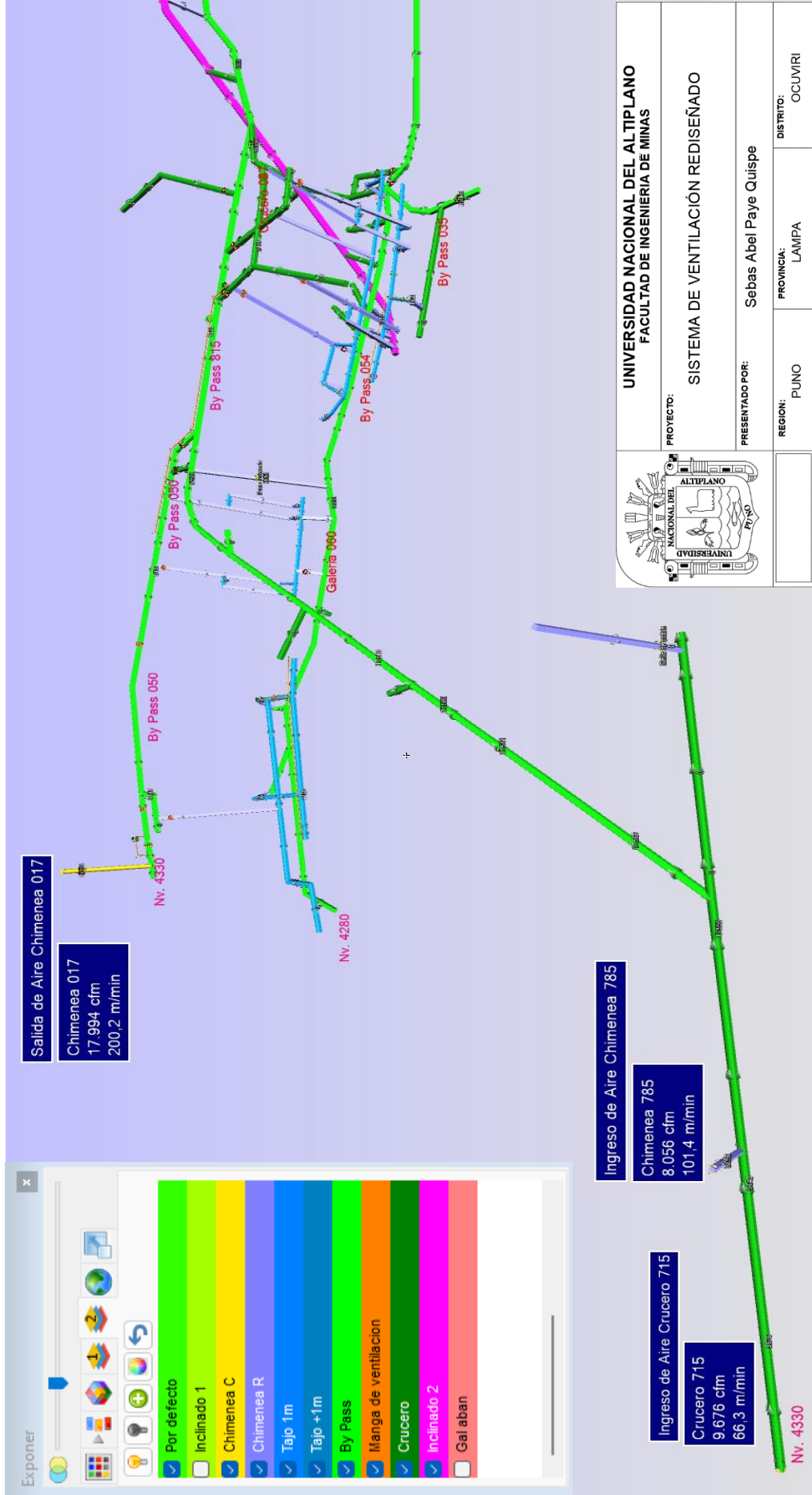


		UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS	
PROYECTO: SISTEMA DE VENTILACION REDISEÑADO - RECIRCULACION MODELADO EN SOFTWARE VENTSIM			
PRESENTADO POR: Sebas Abel Paye Quispe		REGION: PUNO	DISTRITO: OCUVIRI
		PROVINCIA: LAMPA	

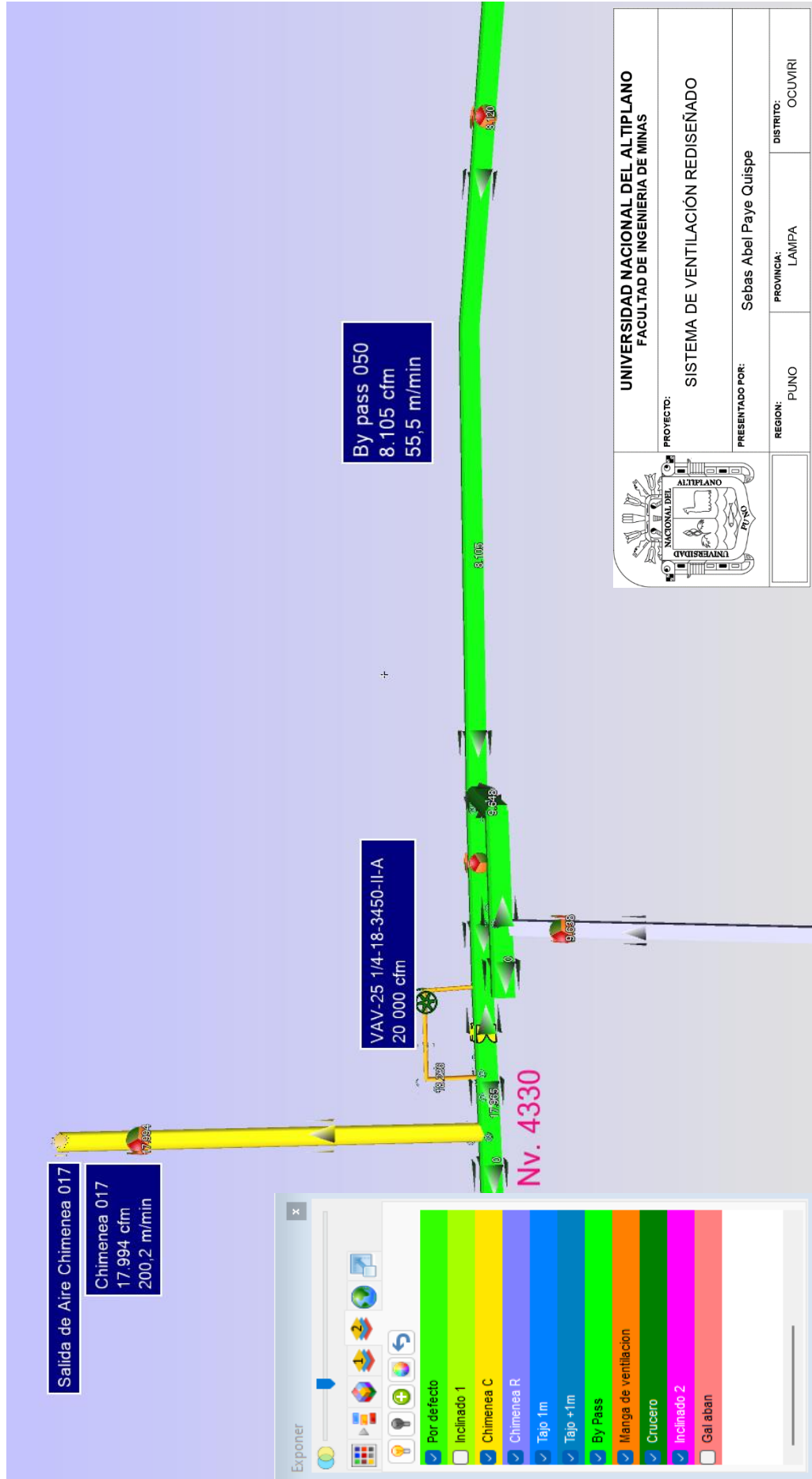
Anexo 8. Diagrama de ingreso y salida de aire del sistema de ventilación rediseñado



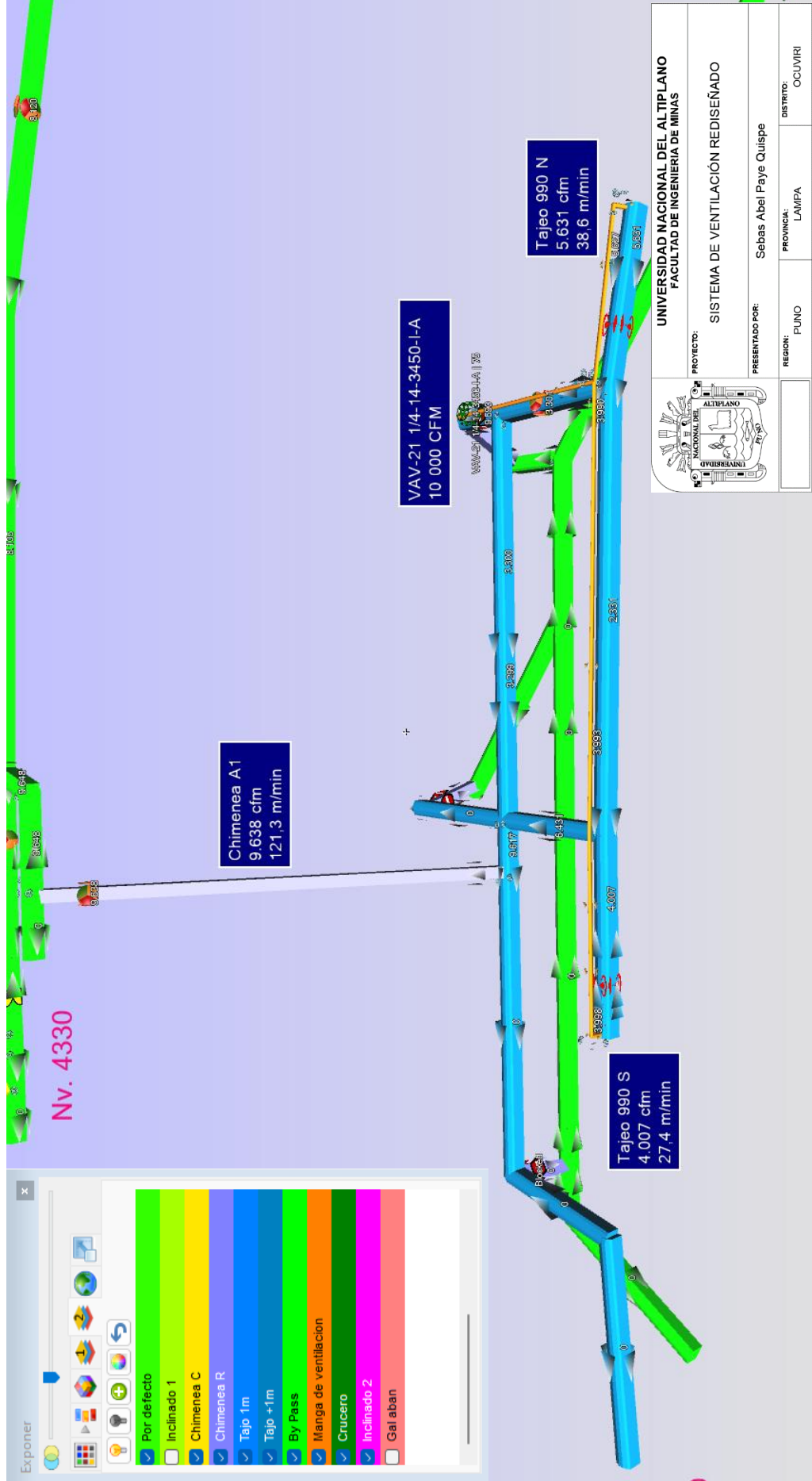
Anexo 9. Rediseño simulación del sistema de ventilación



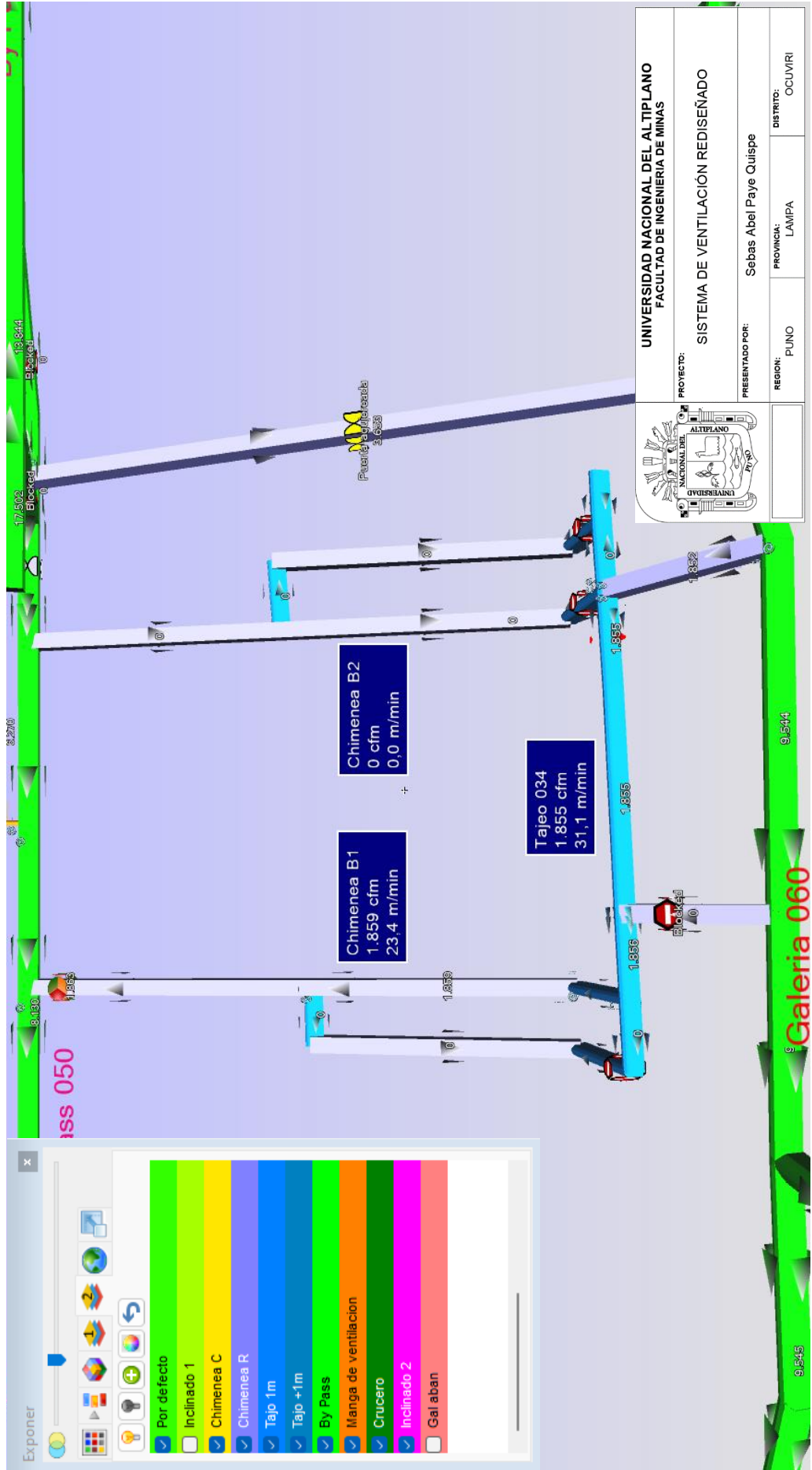
Anexo 10. Modelamiento y simulación del by pass 050 y chimenea 017



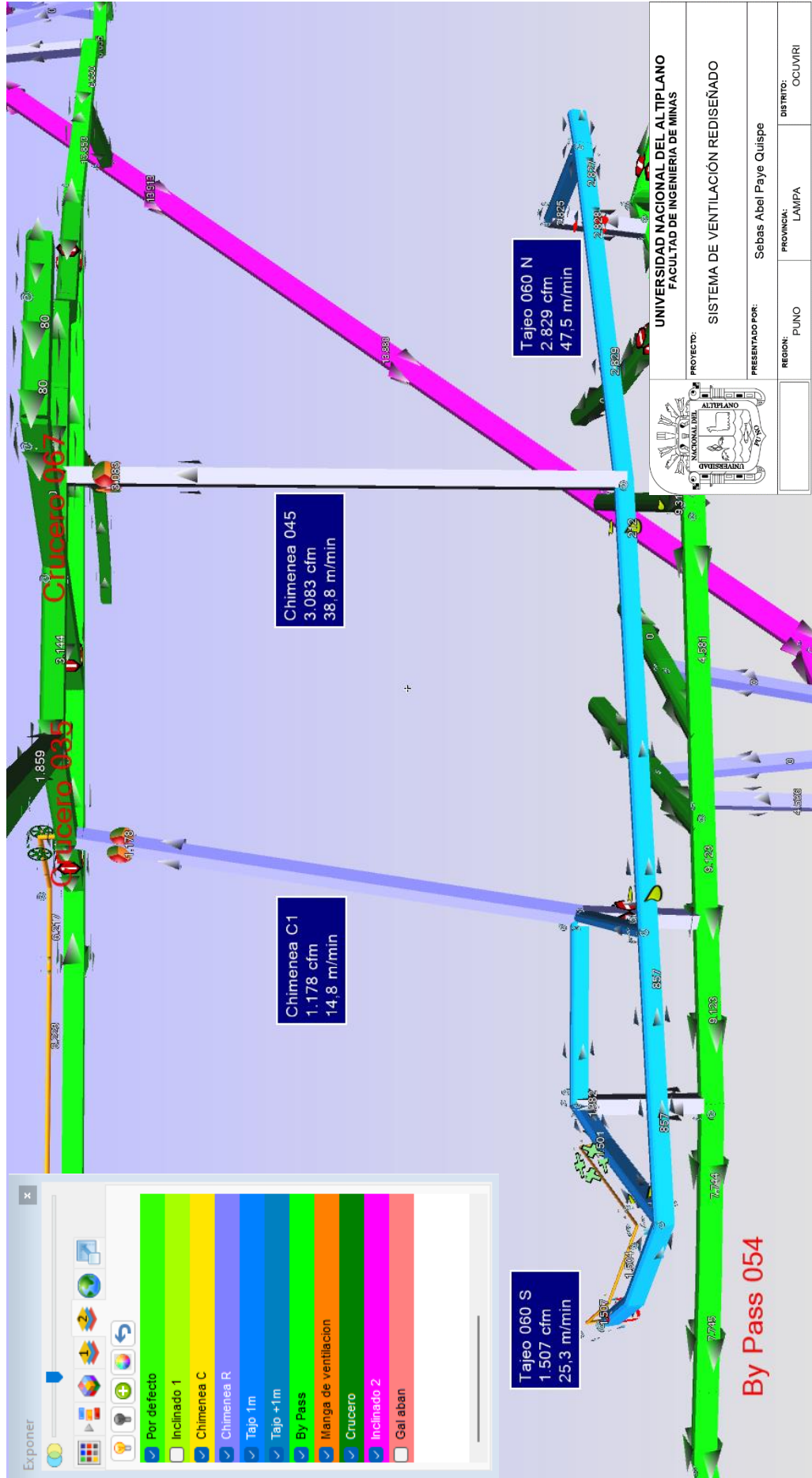
Anexo 11. Modelamiento y simulación del tajeo 990 S – N



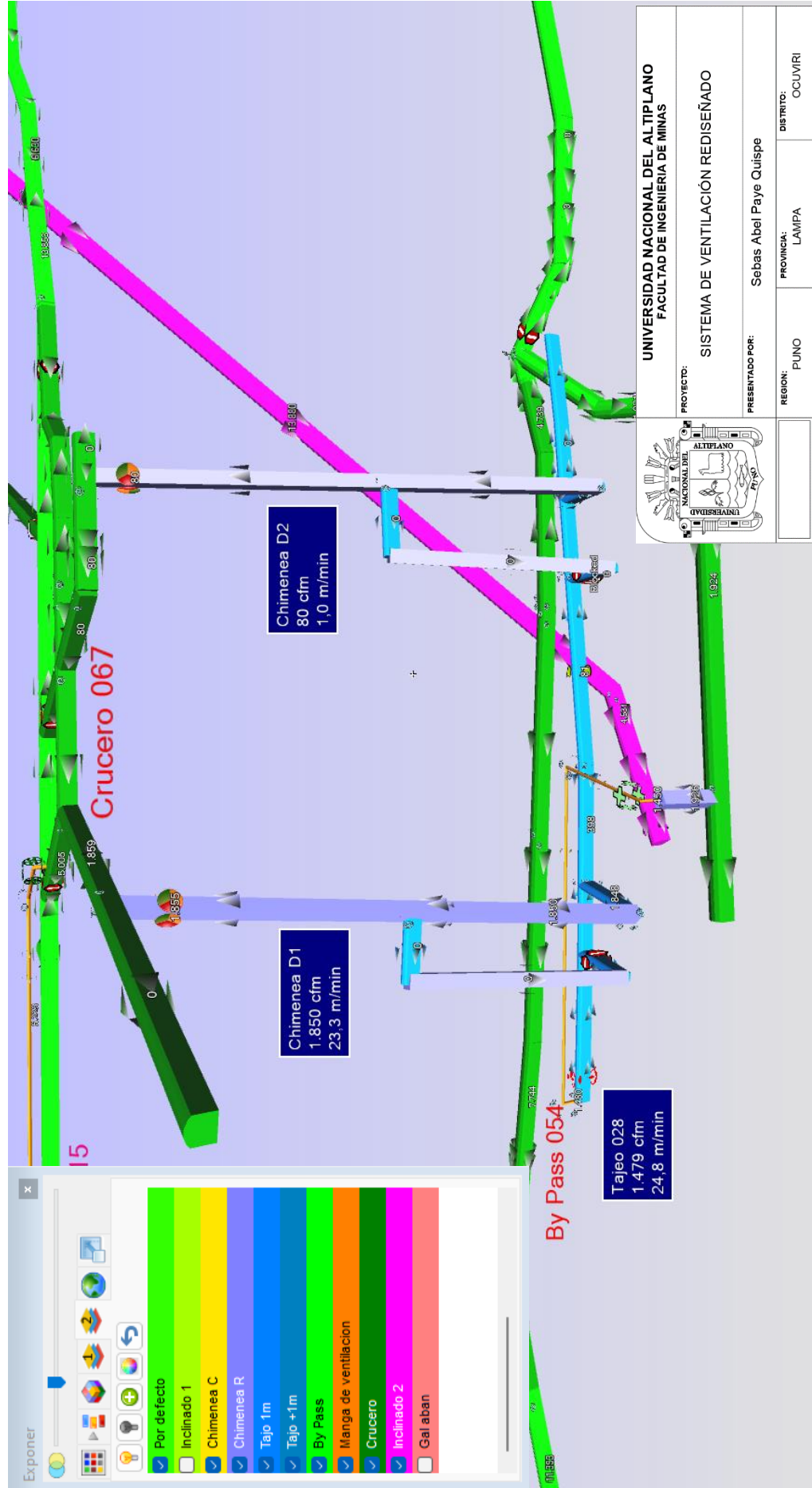
Anexo 12. Modelamiento y simulación del tajeo 034



Anexo 13. Modelamiento y simulación del tajeo 060 S – N

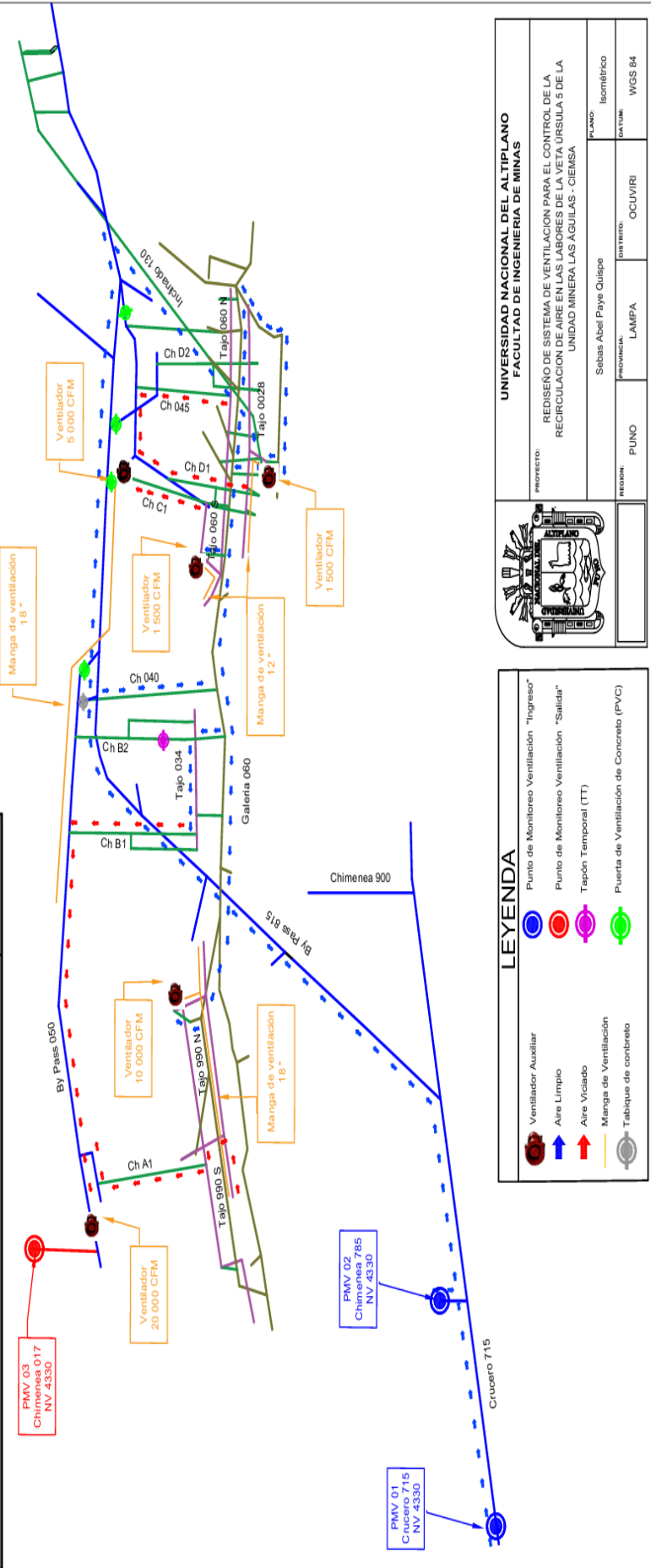


Anexo 14. Modelamiento y simulación del tajeo 028



Anexo 15. Plano isométrico del rediseño del sistema de ventilación

BALANCE TOTAL DE AIRE	
CAUDAL DE AIRE	cfm
TOTAL REQUERIMIENTO DE AIRE EN INTERIOR MINA	11,695.00
INGRESO DE AIRE LIMPIO A INTERIOR MINA	17,732.00
SALIDA DE AIRE DE INTERIOR MINA	17,994.00
COBERTURA	152.00%
SUPERAVIT / DEFICIT	52.00%
DIFERENCIA INGRESO Y SALIDA (no mayor a 10%)	1.48%



LEYENDA

- Ventilador Auxiliar
- Aire Limpio
- Aire Viciado
- Manga de Ventilación
- Tábique de concreto
- Punto de Monitoreo Ventilación "Ingreso"
- Punto de Monitoreo Ventilación "Salida"
- Tapón Temporal (TT)
- Puerta de Ventilación de Concreto (PVC)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS

PROYECTO: REDISEÑO DE SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DE LA RECIRCULACIÓN DE AIRE EN LAS LABORES DE LA VETA URSULA 5 DE LA UNIDAD MINERA LAS AGUILAS - CIEMSA

INGENIERO: PUNO

PROVINCIA: LAMPA

DISTRITO: OCUVIRI

PLANO: Isométrico

DATA: WGS 84

Anexo 16. Galería de fotos



Nota. Monitoreo de velocidad de aire en cámara 130



Nota. Ventilador inyector de 10 000 cfm instalado en el tajeo 990.



Nota. Ventilador extractor de 5 000 cfm instalado en el crucero 035.



Anexo 17. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Sebas Abel Paye Quispe
identificado con DNI 70136309 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Rediseño de sistema de ventilación para el control de recirculación del aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera Las Águilas - CIEMSA"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 10 de abril del 2026


FIRMA (obligatoria)



Huella



Anexo 18. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Sebas Abel Paye Quispe
identificado con DNI 70136309 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Rediseño de sistema de ventilación para el control de recirculación
del aire en las labores de la veta Úrsula 5 de la Unidad Minera
Las Águilas - CIEMSA."

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 10 de abril del 2026


FIRMA (obligatoria)

