

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

“MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI – CAJABAMBA.”

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

AUTOR

Bach. Gonzales Melendez Luis Max

ASESOR:

M. Cs. Ing. Arapa Vilca Víctor Ausberto

CAJAMARCA-PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador : GONZALES MELENDEZ LUIS MAX
DNI : 70208646
Escuela Profesional : INGENIERÍA DE MINAS
2. Asesor : M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
Facultad : INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
5. Título de Trabajo de Investigación:
"MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA VETA O DEL NIVEL O EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI – CAJABAMBA."
6. Fecha de evaluación: 09 de mayo del 2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 3%
9. Código Documento: trn:oid:::3117:457166859
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 09/05/2025



FIRMA DEL ASESOR
M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
DNI: 29552145



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 09/05/2025 10:21:09-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI - CAJABAMBA.

ASESOR : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0208-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 15 de mayo de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **seis días del mes de junio de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada: **MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI - CAJABAMBA**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas **LUIS MAX GONZALES MELENDEZ**, asesorado por el M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 31.0 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 14.0 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 45.0 PTS. CATORCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara aprobado con el calificativo de CATORCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10.0 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Vocal

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la sabiduría que se me ha otorgado, por darme la salud necesaria para poder seguir con las metas trazadas, por la fortaleza, de poder dar siempre el mejor esfuerzo y no rendirme ante las adversidades, y la seguridad de su promesa de que el siempre estará acompañándome.

A mi Alma Mater Universidad Nacional de Cajamarca y a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por la enseñanza requerida y su sabiduría para poder realizar la presente tesis.

A mi asesor Arapa Vilca Víctor Ausberto, por brindarme su tiempo y apoyo, instruyéndome los conocimientos requeridos y depositar su confianza en mí.

A la mina “El Halcón” por brindarme la oportunidad de realizar mi investigación de manera condescendiente y ofreciéndome su entera disposición en todo momento.

L.M

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada principalmente a mis padres, Maximiliano Gonzales Cabrera e Isabel Melendez Gonzales, por su amor y su comprensión.

A mis hermanos Jhoao y Yahaira, por el apoyo moral, por su cariño en todo momento.

A mi mentora Enmy Gonzales Paredes por su apoyo incondicional y su conocimiento para desarrollarme en el ámbito laboral.

L.M

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1 Antecedentes Internacionales	3
2.1.2 Antecedentes Nacionales	3
2.1.3 Antecedentes Locales	4
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 Ventilación	4
2.2.2 Métodos de Ventilación	5
<i>2.2.2.1 Ventilación Natural</i>	5
<i>2.2.2.2 Ventilación Auxiliar</i>	5
2.2.3 Variables de Control de Ventilación	6
2.2.4 Tipo de Ventiladores	7
<i>2.2.4.1 Ventilador Axial</i>	7
<i>2.2.4.2 Ventilador Centrífugo</i>	8
<i>2.2.4.3 Ventilador de Refugio</i>	8
<i>2.2.4.4 Ventilador de Extracción de Gases</i>	8

2.2.5	Aire y Contaminantes	9
2.2.6	Atmosfera de la Mina	9
2.2.7	Gases Contaminantes	9
2.2.8	Polvo en Suspensión	10
2.2.9	Deficiencia de Oxígeno	11
2.2.10	Temperatura en Mina Subterránea	11
2.2.11	Atribución de la velocidad de Aire	12
2.2.12	Componentes y Diseños del Sistema de Ventilación Auxiliar	12
2.2.12.1	<i>Esquema</i>	12
2.2.12.2	<i>Diseño General del Funcionamiento</i>	13
2.2.12.3	<i>Introducción de Aire Fresco</i>	13
2.2.12.4	<i>Extracción de Aire Viciado</i>	13
2.2.12.5	<i>Distribución de Aire</i>	13
2.2.12.6	<i>Beneficios del Sistema Auxiliar</i>	13
2.2.13	Cálculo del caudal del aire	14
2.2.13.1	<i>Caudal Necesario para Número de Personas</i>	14
2.2.13.2	<i>Caudal Necesario para Equipo Diésel</i>	14
2.2.13.3	<i>Caudal en el uso de Explosivos</i>	15
2.2.13.4	<i>Caudal para Condiciones Ambientales Optimas</i>	15
2.2.13.5	<i>Caudal por Filtraciones o Fugas</i>	15
2.2.14	Normas Legales	16
2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	17

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19
3.1.1	Accesibilidad	20
3.2	GEOLOGÍA LOCAL	21
3.2.1	Formación Chimú	21
3.2.2	Formación Santa	22
3.3	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	23
3.3.1	Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación	23
3.3.2	Población de Estudio	23

3.3.3	Muestra	23
3.3.4	Unidad de Análisis	23
3.3.5	Definición de Variables	23
3.3.5.1	<i>Independiente</i>	23
3.3.5.2	<i>Dependiente</i>	24
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	24
3.4.1	Técnicas	24
3.4.2	Instrumentos, Materiales y Equipos	24
3.5	ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE DATOS	25
3.5.1	Identificación del Avance y Frente de Trabajo	25
3.5.2	Identificación de Puntos Específicos para toma de Datos	25
3.5.3	Generación de Datos	25
3.5.4	Generalidades de la Mina “El Halcón”	25
3.5.4.1	<i>Componentes</i>	25
3.5.4.2	<i>Dimensiones y Ubicación del Nivel 0 y Veta 0</i>	27
3.6	PROCEDIMIENTO OPERATIVO DEL NIVEL 0 EN LA VETA 0	28
3.7	SISTEMA DE VENTILACIÓN DE LA MINA “EL HÁLCÓN”	29
3.7.1	Caudales de Aire Requeridos	29
3.7.1.1	<i>Caudal de Aire Necesario para el Personal</i>	30
3.7.1.2	<i>Caudal de Aire Necesario para uso de Madera</i>	30
3.7.1.3	<i>Caudal Requerido por Temperatura en el Frente de Trabajo</i>	31
3.7.1.4	<i>Caudal de Aire Necesario por Fugas</i>	31
3.7.1.5	<i>Caudal de Aire Necesario por uso de Explosivos</i>	32
3.7.2	Medición del Caudal de Aire real de la Mina “El Halcón”	32

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE RESULTADOS

4.1	CAUDAL DE AIRE REQUERIDO EN LA MINA	34
4.1.1	Cálculo del Caudal de Aire Necesario para el Personal	34
4.1.2	Cálculo del Caudal de Aire Necesario para el uso de Madera	35
4.1.3	Cálculo del Caudal de Aire Necesario para Temperatura	35
4.1.4	Cálculo del Caudal Requerido por Fugas	36
4.1.5	Cálculo del Caudal Total Requerido	37

4.1.6	Cálculo del Caudal por uso de Explosivos	37
4.1.7	Comparación de los Cálculos Obtenidos.....	38
4.2	CAUDAL ACTUAL EN LA MINA “EL HALCÓN”	38
<i>4.2.1.1</i>	<i>Mediciones Reales en el Nivel 0.....</i>	<i>38</i>
4.3	PROPUESTA DE SISTEMA DE VENTILACIÓN SEGÚN CÁLCULOS	39
4.3.1	Creación del Sistema de Ventilación Real en el Software Ventsim	39
4.3.2	Incorporación de Ventiladores Auxiliares.....	42
<i>4.3.2.1</i>	<i>Elección de Condiciones del Ventilador.....</i>	<i>43</i>
<i>4.3.2.2</i>	<i>Digitalizador de Ventilador en el Software Ventsim.....</i>	<i>44</i>
4.3.3	Elección de Curvas del Ventilador.....	46
4.3.4	Datos Obtenidos de las Curvas del Ventilador VAV-18-14-3450-I-A.....	65
4.3.5	Características del Ventilador Simulado.....	65
4.4	CONTRASTACION DE LA HIPÓTESIS.....	66
4.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	68
5.2	RECOMENDACIONES.....	69
5.4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	70
5.5	ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Composición de aire seco.	9
Tabla 2: Clasificación de los gases.	10
Tabla 3: Tamaño de partículas y sus efectos.	10
Tabla 4: Efectos causados por deficiencia de oxígeno.	11
Tabla 5: Sensación Térmica.	12
Tabla 6: Acceso al área de la mina "El Halcón".	20
Tabla 7: Unidades Geológicas de la mina "El Halcón".	23
Tabla 8: Cantidad de aire mínimo según RSSO.	30
Tabla 9: Factor de Producción por uso de madera.	31
Tabla 10: Escala establecida de acuerdo al artículo 252.	31
Tabla 11: Calculo del caudal total necesario.	37
Tabla 12: Resultados de los caudales.	38
Tabla 13: Datos obtenidos en campo.	39
Tabla 14: Cálculo de la velocidad promedio total obtenido en el nivel 0.	39
Tabla 15: Caudal total por cada curva.	65
Tabla 16: Ventilador Simulado	66

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Ventilación Natural.....	5
Figura 2: Sistema de Ventilación Combinado.....	6
Figura 3: Ventilador Axial.....	8
Figura 4: Ventilador Centrífugo.....	8
Figura 5: Ubicación de la mina "El Halcón".....	19
Figura 6: Rutas hacia la mina Cajamarca – Cachachi.....	20
Figura 7: Vía asfaltada que nos dirige distrito de Cachachi.....	21
Figura 8: Formaciones en la mina "El Halcón".....	22
Figura 9: Formación Santa.....	22
Figura 10: Componentes en superficie.....	26
Figura 11: Ventilador al interior de la mina.....	26
Figura 12: Frente de trabajo.....	27
Figura 13: Toma de medidas de la Bocamina.....	27
Figura 14: Ubicación de la campana de succión.....	29
Figura 15: Método de Barrido.....	33
Figura 16: Recopilación de datos con el método de barrido.....	33
Figura 17: Dato obtenido en el frente de trabajo.....	36
Figura 18: Creación de las galerías según los datos obtenidos.....	40
Figura 19: Simulación del sistema de ventilación en el Software VENTSIM.....	41
Figura 20: Curva característica.....	42
Figura 21: Condiciones del ventilador incorporado.....	43
Figura 22: Ventilador utilizado VAV-18-14-3450-II-A.....	44
Figura 23: Región definida del ventilador.....	45
Figura 24: Implementación de curvas al SOFTWARE.....	45
Figura 25: Curvas totales del ventilador.....	46
Figura 26: Curva característica 1.....	47
Figura 27: Sistema de ventilación simulado 01.....	48
Figura 28: Curva característica 2.....	49
Figura 29: Sistema de ventilación simulado 02.....	50
Figura 30: Curva característica 3.....	51
Figura 31: Sistema de ventilación simulado 03.....	52

Figura 32: Curva característica 4.	53
Figura 33: Sistema de ventilación simulado 04	54
Figura 34: Curva característica 5.	55
Figura 35: Sistema de ventilación simulado 05	56
Figura 36: Curva característica 6.	57
Figura 37: Sistema de ventilación simulado 06.	58
Figura 38: Curva característica 7.	59
Figura 39: Sistema de ventilación simulado 07.	60
Figura 40: Curva característica 8.	61
Figura 41: Sistema de ventilación simulado 08.	62
Figura 42: Curva característica 9.	63
Figura 43: Sistema de ventilación simulado 09.	64

LISTA DE ABREVIATURAS

CFM:	Pies cúbicos por minuto.
CO₂:	Dióxido de carbono.
D.S.:	Decreto Supremo.
Epp:	Equipo de Protección Personal.
GEOCADMIN:	Sistema de Información Geológico y Catastral Minero.
IGAFOM:	Instrumento de Gestión Ambiental para la Formalización de Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal.
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar.
PPM:	Pequeño productor artesanal.
Q:	Caudal de aire.
Q_{Tr}:	Caudal para el personal.
Q_{Ma}:	Caudal para uso de madera.
Q_{Ex}:	Caudal para uso de explosivos.
Q_{Fu}:	Caudal para fugas.
SSO.:	Seguridad, salud ocupacional.
T:	Temperatura.
UTM:	Universal Transversal Mercator (Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator).
V_{prom}:	Velocidad Promedio.
WGS-84:	World Geodetic System (Sistema Geodésico de Coordenadas Geográficas de 1984).

RESUMEN

El estudio de la presente investigación es optimizar el sistema de ventilación de la mina subterránea “El Halcón” la cual se ubica en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca. Dicha optimización busca garantizar la seguridad y rendimiento de los trabajadores ya que el sistema de ventilación presenta deficiencias significativas en el nivel 0. Para ello se procede a calcular el caudal total de aire necesario la cual se fundamenta en diversos factores reales de la mina, entre las cuales se tomaron; el caudal de aire requerido para trabajadores, caudal de aire necesario por uso de madera, caudal de aire requerido por temperatura y el caudal de aire requerido por fugas, medida en pies cúbicos por minuto (CFM), y compararla con el caudal de aire real presente en la mina según el avance actual. A través del uso del Software Ventsim, se propone la mejora del sistema de ventilación la cual consiste en la incorporación de ventiladores específicos, detallados como VAV-18-14-3450-I-A, seleccionados por sus características técnicas. Concluyendo que esta propuesta busca incrementar el caudal real del nivel 0 y garantizar condiciones adecuadas para las operaciones a través de la elección de la curva característica del ventilador. Los resultados obtenidos muestran que la implementación de la solución propuesta permitirá cumplir con los requerimientos de caudal de la mina, mejorando significativamente el sistema de ventilación actual.

PALABRAS CLAVE: Sistema de Ventilación, Caudal de Aire, Curva Característica, Pies Cúbicos por Minuto (CFM), Ventilador Auxiliar.

ABSTRACT

The purpose of this research is to optimize the ventilation system of the subway mine “El Halcón”, which is located in the district of Cachachi, province of Cajamarca. This optimization seeks to ensure the safety and performance of workers since the ventilation system has significant deficiencies at level 0. To do this we proceed to calculate the total air flow required which is based on various real factors of the mine, among which were taken; the air flow required for workers, air flow required by use of wood, air flow required by temperature and air flow required by leaks, measured in cubic feet per minute (CFM), and compare it with the actual air flow present in the mine according to the current progress. Through the use of Ventsim software, the improvement of the ventilation system is proposed, which consists of the incorporation of specific fans, detailed as VAV-18-14-3450-I-A, selected for their technical characteristics. Concluding that this proposal seeks to increase the real flow rate of level 0 and to guarantee adequate conditions for the operations through the choice of the fan characteristic curve. The results obtained show that the implementation of the proposed solution will meet the flow requirements of the mine, significantly improving the current ventilation system.

KEYWORDS: Ventilation System, Air Flow Rate, Characteristic Curve, Cubic Feet per Minute (CFM), Auxiliary Fan.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La ventilación en minas subterráneas consiste en suministrar una cantidad necesaria de aire, conteniendo un porcentaje sumamente importante de oxígeno, la cual nos asegura un ambiente libre de varios factores perjudiciales, como también un buen indicador de labores seguras adecuadas al personal en el interior de la mina. Dicha ventilación puede darse de manera natural o mecanizada, la cual aporta un desarrollo óptimo en las operaciones, en el personal, los equipos utilizados y sobre todo la seguridad de todas las personas involucradas. La mina “El Halcón” cuenta con un sistema de ventilación deficiente; la cual no es actualizada de acuerdo a la realidad de sus avances. Dicho avance tiene una necesidad fundamental, la cual consta de varios factores; ventilación de gases tóxicos producidos por uso de explosivos, caudal de aire por presencia de puntales de madera, el número de trabajadores operando dentro de la mina y sobre todo el nuevo caudal total necesario para producir las toneladas diarias extraídas de la mina. Es por ello, que esta investigación, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo mejorar el sistema de ventilación subterránea de la veta 0 del nivel 0 en la mina El Halcón distrito Cachachi – Cajabamba?, de acuerdo con esta interrogante se plantea la siguiente hipótesis de mejorar el sistema de ventilación subterránea de la veta 0 del nivel 0 incrementará la eficiencia de la mina “El Halcón”, a través de la evaluación del caudal de aire necesario del personal, caudal necesario para el uso de madera y el caudal necesario por uso de explosivos de la mina subterránea. La propuesta de mejora del sistema de ventilación contempla la incorporación de ventiladores auxiliares basando los resultados de los caudales de aire requerido y real simulado en el Software Ventsim. Este estudio se justifica como una medida para evaluar y mejorar las condiciones de ventilación dentro de la mina “El Halcón”. Mediante la recopilación de datos sobre el caudal total del aire actual para el uso de explosivos, para uso de madera y para el personal. Como objetivo general se tiene: Mejorar el sistema de ventilación de la veta 0 del nivel 0 en la mina El Halcón distrito Cachachi – Cajabamba. Asimismo, para lograrlo se tiene como objetivos específicos; calcular el caudal de aire requerido en mina, determinar el caudal actual en mina

y proponer la de incorporación de ventiladores auxiliares basados en la simulación del Software VENTSIM. El enfoque de la estructura de la investigación se ha centrado en cinco capítulos. En el capítulo I, presenta la problemática, la justificación de la investigación, los objetivos y las hipótesis. En el capítulo II, capítulo trata sobre el marco teórico y detalla los antecedentes nacionales, internacionales y locales, así como las bases teóricas. Incluye definiciones y conceptos más relevantes para la investigación. En el capítulo III, Materiales y Métodos, trata sobre la metodología del trabajo, los procedimientos, la identificación de variables, los instrumentos y los equipos que se utilizarán. En el capítulo IV, que incluye el análisis y discusión de los resultados, proporcionará información detallada y precisa, así como el diagnóstico y el análisis de la situación actual para facilitar la contratación de la hipótesis diseñada. En el capítulo V, finaliza con las conclusiones y recomendaciones, donde las conclusiones son los resultados de los objetivos planteados al inicio de la investigación, las recomendaciones y las referencias bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Aranguaren (2021), en su tesis titulada “Evaluación del sistema de ventilación de la mina El Roble”, concluye que los inconvenientes y fallas de la ventilación en la operación minera, mediante trabajo de campo como aforos y mediciones, además de emplear el Software VENTSIM para modelar el sistema y proponer una solución óptima. de las cuales se plantearon alternativas de mejoramiento al sistema de ventilación las cuales tienen que realizarse frecuentemente y de acuerdo con la necesidad y requerimiento de aire calculado.

Rivas Chacón (2020), en su investigación titulada “Diseño del sistema de ventilación de la mina subterránea de oro Sosa Méndez, Municipio el Callao, Edo bolívar –Venezuela”, concluye que los parámetros de explotación y las características geológicas del yacimiento permitió elaborar la metodología para diseñar el esquema de ventilación que incluye el cálculo de la cantidad de aire para la ventilación de los sectores de extracción y de los frentes en preparación.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Valle (2021), en su investigación titulada “Optimización del sistema de ventilación de la mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A”, concluye que el sistema de ventilación es muy sensible a los cambios debido a la variación de los puntos de trabajo, asimismo por los frentes ciegos se usó ventilación auxiliar desde la boca mina, los gases y contaminantes sales fuera de mina a través de la labor, siendo necesario la evacuación del personal durante la ventilación.

Llanos (2020), en su investigación titulada “Estudio de ventilación e implementación de mejoras en el circuito de ventilación de minera SOTRAMI s.a. – UEA Santa Filomena – aplicando el Software VENTSIM”, concluye que los ventiladores auxiliares, no contaban

con un programa de mantenimiento y ubicación adecuado mensual, se implementó un control para garantizar una buena operación de estos instrumentos que mantienen la ventilación activa en la mina.

2.1.3 Antecedentes Locales

Gonzales & Espiche (2020), en su tesis titulada “Evaluación del sistema de ventilación en la minera artesanal subterránea de Algamarca, Cajabamba”, estos autores concluyen que unidad minera de Algamarca presentó un sistema de ventilación en situaciones no óptimas, estos resultados se presentaron por medio de gráficos y tablas, cada una con sus respectivos análisis contribuyendo a comprobar la hipótesis y de la cual se constató que cuenta con un sistema de ventilación impelente, el cual es monitoreado por un experto.

Tasilla (2021), en su tesis titulada “Evaluación y optimización del sistema de ventilación del túnel de exploración Chaquicocha nivel 3750 - minera Yanacocha, 2018”, concluye que los caudales de aire medidos en campo del sistema de ventilación implementado, se encuentran por debajo de los valores obtenidos del modelo realizado en el Software en VENTSIM, estas variaciones se encuentran en un rango de 2.0% a 5.2 %, esto debido a que del modelo de ventilación realizado en el Software VENTSIM se obtienen valores en condiciones ideales.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Ventilación

La ventilación en minas subterráneas es un sistema fundamental para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, así como para mantener condiciones adecuadas de temperatura, humedad y calidad del aire dentro de los espacios subterráneos. La ventilación minera es un proceso crítico que implica el control y la circulación del flujo de aire a través de galerías, túneles y otras excavaciones subterráneas, con el fin de diluir y eliminar contaminantes como gases tóxicos, polvo y vapores peligrosos, así como para proporcionar oxígeno suficiente para los trabajadores y equipos. Un diseño y gestión adecuados del sistema de ventilación son esenciales para prevenir accidentes, enfermedades respiratorias y otros riesgos asociados con la minería subterránea. (Hartman, 1997).

2.2.2 Métodos de Ventilación

2.2.2.1 Ventilación Natural

La ventilación natural implica el movimiento del aire que proviene del exterior de la mina y que se dirige a través de la entrada, túneles o chimeneas, esto varía según el diseño de cada mina. Este tipo de ventilación es frecuentemente utilizado en operaciones que no avanzan significativamente, ya que su corta distancia permite que se reduzcan los gases tóxicos generados por explosivos, maquinaria y otros factores. Además, se pueden añadir otras técnicas para optimizar la circulación del aire. También se menciona que, en la minería subterránea, la ventilación natural se refiere al flujo de aire dentro de la mina, causado por diferentes temperaturas y presiones entre el interior y el exterior de la estructura. Este sistema utiliza elementos naturales para ofrecer aire fresco y ayudar en la dilución y eliminación de contaminantes. La ventilación natural es una estrategia pasiva que puede recibir apoyo de otros sistemas de ventilación para mejorar el intercambio de aire en la mina. (De la Cuadra Irizar, 1974).

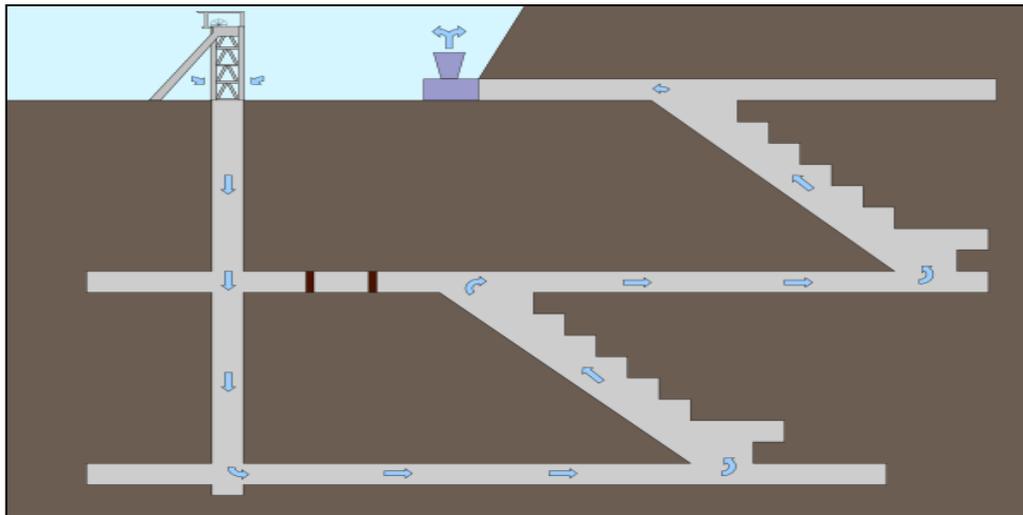


Figura 1: Ventilación Natural.

Fuente: (De la Cuadra Irizar, 1974)

2.2.2.2 Ventilación Auxiliar

La ventilación adicional cumple un papel fundamental en garantizar entornos laborales seguros y saludables. En ciertas áreas de la mina, donde el aire fresco es escaso y eliminar los agentes tóxicos es complicado, contar con sistemas de aire suplementarios resulta esencial para mejorar la seguridad del ambiente. Estos sistemas de ventilación suplementaria pueden abarcar ventiladores extra, conductos de ventilación temporales o

dispositivos de aire móviles que minimizan la presencia de sustancias dañinas en lugares de trabajo críticos y optimizan el flujo del aire (Ramirez, 2005).

Entre las ventilaciones auxiliares básicas se encuentra los siguientes sistemas:

- Sistema Aspirante: Es un tipo de sistema que se utiliza para extraer aire viciado, gases nocivos y contaminantes del interior de una mina subterránea. Controla la concentración de gases peligrosos y garantizar una adecuada circulación de aire.
- Sistema Impelente: Este tipo de sistema permite inducir activamente el flujo de aire fresco hacia el interior de una mina subterránea.
- Sistema Combinado: Es la unión de los sistemas anteriores en uno solo.

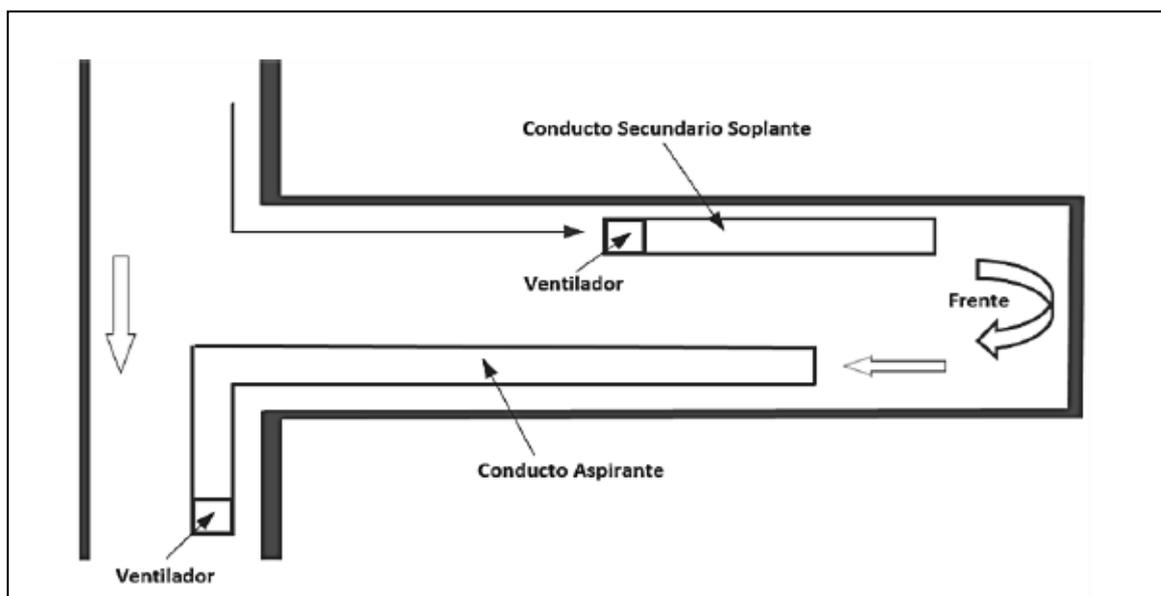


Figura 2: Sistema de Ventilación Combinado.

Fuente: (López, 2008)

2.2.3 Variables de Control de Ventilación

Las variables de control de ventilación en una mina subterránea pueden variar dependiendo del diseño específico del sistema de ventilación y de las condiciones de la mina. Sin embargo, algunas variables comunes que suelen ser monitoreadas y controladas de las cuales incluyen:

- Velocidad del flujo de aire: Es aquella velocidad que desplaza a través de las galerías y piques de la mina. Este flujo al ser controlado garantiza una circulación eficiente para diluir cualquier tipo de agente nocivo presente en el aire.

- **Presión diferencial:** Es aquella presión entre parte interna y externa de la mina. Controlarla ayuda a prevenir un porcentaje de los agentes contaminantes y garantiza una ventilación eficiente en todas las áreas, siendo galerías o niveles.
- **Temperatura y humedad del aire:** Variables presentes para controlar comodidad confortables y seguras para los trabajadores. Controlar estas variables permite sobrecarga térmica y evita riesgos de enfermedades ocupacionales.
- **Concentración de contaminantes:** Variable que contiene los gases tóxicos, polvo en suspensión y otros contaminantes que están presentes en el aire de la mina. Controlar esta variable protege la salud de los trabajadores cumpliendo con la salud ocupacional y el reglamento de seguridad y salud en el trabajo.
- **Dirección del flujo de aire:** Se refiere a la dirección en la que se mueve el flujo de aire dentro de la mina. Controlar la dirección del flujo de aire es importante para dirigir el aire fresco hacia las áreas de trabajo y para evitar la acumulación de contaminantes en áreas críticas.
- **Nivel de oxígeno:** Variable importante a monitorear, ya que los niveles de oxígeno en el aire para garantizar un suministro adecuado para la respiración y para prevenir el riesgo de asfixia en caso de una reducción en los niveles de oxígeno. (Kingery, 1960)

2.2.4 Tipo de Ventiladores

2.2.4.1 Ventilador Axial

Estos ventiladores han sido creados con el propósito de dirigir el aire en una línea paralela al eje. Son ideales para trasladar grandes cantidades de aire a presiones reducidas, lo que los convierte en la opción viable para la ventilación principal en túneles y galerías de minas subterráneas (Luque, 1998).



Figura 3: Ventilador Axial.

Fuente: (Airtec, 2017)

2.2.4.2 Ventilador Centrífugo

Estos tipos de ventiladores están hechos para crear presiones más elevadas que los ventiladores axiales. Se emplean para la ventilación principal en secciones de la mina donde es necesario contar con una mayor presión. Esto ayuda a vencer la resistencia del aire al pasar por túneles largos o angostos (Zitrón, 2010).

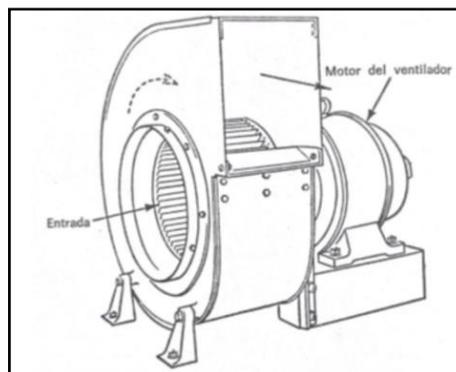


Figura 4: Ventilador Centrífugo.

Fuente: (Airtec, 2017)

2.2.4.3 Ventilador de Refugio

Estos ventiladores han sido creados especialmente para ofrecer aire fresco en refugios subterráneos de seguridad durante situaciones de emergencia. Son de tamaño reducido y cuentan con sistemas de filtrado que garantizan aire puro y seguro por largos períodos (Herbet, 2019).

2.2.4.4 Ventilador de Extracción de Gases

Estos ventiladores se emplean para eliminar gases peligrosos, como el dióxido de carbono (CO₂) y los gases generados por la combustión, en espacios de trabajo subterráneos.

Contribuyen a mantener concentraciones de gas en niveles seguros y a salvaguardar la salud de los empleados (Herbet, 2019).

2.2.5 Aire y Contaminantes

En la minería subterránea, dos aspectos fundamentales a tener en cuenta son el aire y los contaminantes. Estos elementos son esenciales para asegurar la salud y la seguridad de los trabajadores. (Yoman, 2017).

2.2.6 Atmosfera de la Mina

La calidad del aire en las minas subterráneas puede cambiar constantemente según diversos factores, como la existencia de materiales contaminantes, el nivel de oxígeno que hay y la humedad del ambiente. Es esencial garantizar un flujo suficiente de aire fresco mediante sistemas de ventilación, con el fin de reducir la concentración de contaminantes y asegurar que los niveles de oxígeno se mantengan seguros en todas las zonas de trabajo subterránea (Novistky, 1962).

Tabla 1: Composición de aire seco.

Gas	% En volumen	% En peso
Nitrógeno	78,09	75,53
Oxígeno	20,95	23,14
Anhidrido Carbónico	0,03	0,046
Argón y otros gases	0,93	1,284

Fuente: (Novistky, 1962).

2.2.7 Gases Contaminantes

Los agentes contaminantes presentes en las minas subterráneas pueden consistir en diversas sustancias dañinas, incluyendo gases dañinos como el monóxido de carbono y el dióxido de azufre, además de vapores de diésel y otros residuos generados por la minería. Estas sustancias contaminantes se producen a raíz de operaciones mineras tales como la extracción, transporte y tratamiento de minerales, así como el uso de maquinaria y equipos. La exposición continua a estos contaminantes puede dar lugar a varios problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias, envenenamientos y otros efectos negativos en la salud (Finkelman, 2003).

Tabla 2: Clasificación de los gases.

Irritantes asfixiantes	Sofocantes	Explosivos inflamables
Monóxido de carbono	Nitrógeno	Metano
Hidrogeno sulfurado	Anhídrido carbónico	Monóxido de carbono
Dióxido de nitrógeno (humos nitrosos)	Metano	Hidrogeno sulfurado
Anhídrido sulfuroso		

Fuente: (OSINERGMIN, 1996)

2.2.8 Polvo en Suspensión

El polvo de las minas consiste en partículas muy finas de minerales que flotan en el aire alrededor de las actividades mineras. La cantidad de estas partículas en el aire depende de su forma, peso, velocidad del aire, así como de la humedad y la temperatura. El polvo suspendido es uno de los contaminantes más significativos en las actividades mineras. Este tipo de polvo se produce en diversas fases de la extracción de minerales, como la perforación, la explosión, la carga y el movimiento de maquinaria, entre otros. Además, se ha descubierto que las partículas más pequeñas son las más riesgosas, ya que se quedan más tiempo en el aire y pueden alcanzar las zonas más profundas de los bronquios (Oyarzun, 2015).

Estas se clasifican de la siguiente manera.

- Partículas dañinas: Son las que afecta principalmente al sistema respiratorio, las cuales se encuentran; sílice, berilio, estaño, hierro.
- Partículas tóxicas: Son partículas venenosas, entre las más comunes se encuentran el arsénico y el plomo.

Tabla 3: Tamaño de partículas y sus efectos.

Tamaño de las partículas	Capacidad de penetración pulmonar
Mayor o igual a 50 micras	No puede inhalarse
10 – 50 micras	Retención en la nariz y garganta
Menor o igual a 5 micras	Penetración hasta el alveolo personal

Fuente: (OSINERGMIN, 1996).

2.2.9 Deficiencia de Oxígeno

La falta de oxígeno se debe a una ventilación insuficiente en la mina. Esta situación puede tener consecuencias negativas para los trabajadores que realizan sus tareas, afectando gravemente su salud e incluso provocando la muerte. (Herbert, 2019).

Tabla 4: Efectos causados por deficiencia de oxígeno.

Contenido de Oxígeno	Efectos
17%	Respiración agitada y profunda
15%	Vértigo, vahído, zumbido y molestia auditiva, aceleración de latidos
12%	Pérdida de conocimiento, desmayo, muerte

Fuente: (Herbert, 2019)

2.2.10 Temperatura en Mina Subterránea

La temperatura en una mina subterránea está determinada por varios factores las cuales son fundamentales al tomar decisiones a largo plazo, las cuales son:

- Temperatura del aire fuera de la mina.
- Calentamiento por compresión del aire de acuerdo al avance de la mina.
- Temperatura del macizo rocoso.
- Procesos endotérmicos.
- Procesos exotérmicos.
- Intensidad de ventilación.

Es importante tener en cuenta que la temperatura dentro de la mina subterránea no debe caer por debajo de 2 °C. Una temperatura excesivamente baja puede provocar el congelamiento del agua que se encuentra en las galerías o en las tuberías. La temperatura, tanto en sus extremos máximos como en los mínimos, es clave en el entorno laboral, pues asegura una sensación térmica constante cuando se controla adecuadamente. No obstante, esto varía según las condiciones geográficas y/o climáticas del lugar de trabajo. (Herbet, 2019).

2.2.11 Atribución de la velocidad de Aire

La velocidad de aire en una mina subterránea es un agente regulador para una temperatura, ya que este puede eliminar el calor generado por el avance de la mina en sí. Es por ello que a mayor a 5m/s no hay mayor influencia práctica (Herbet, 2019).

Tabla 5: Sensación Térmica.

Humedad relativa	Temperatura Seca	Velocidad Mínima
< 85 %	24 a 30 °C	30 m/min.
> 85 %	> 30 °C	120m/min.

Fuente: (Herbert ,2019)

2.2.12 Componentes y Diseños del Sistema de Ventilación Auxiliar

2.2.12.1 Esquema

Un plan fundamental para un sistema de ventilación adicional en una mina subterránea nos ayuda a entender de manera clara qué tipo de ventilación es la más adecuada y cómo gestionar el aire que entra en la mina. (Córdova & Molina Escobar, 2011).

Entre ellas tenemos:

- Ventiladores Axiales o Centrífugos: Se utilizan ventiladores portátiles para mover el aire fresco hacia áreas específicas de trabajo. Los ventiladores axiales son más comunes en minería subterránea debido a su capacidad para mover grandes volúmenes de aire con baja presión.
- Conductos de Ventilación: también llamados ductos flexibles o metálicos, se utilizan para dirigir el aire desde los ventiladores hacia los puntos de trabajo. Pueden ser de tela reforzada, PVC, o metálicos, según la aplicación. Además de ser ajustables para acomodarse a la geometría del área de trabajo.
- Sistemas de Refuerzos y Sellado: Se instalan válvulas de regulación de flujo, cortinas o paneles de ventilación que ayudan a controlar el flujo de aire y evitar pérdidas.
- Sensores y Monitoreo: Sensores que detectan niveles de gases nocivos como CO (monóxido de carbono), NO_x, o metano, también se monitorean parámetros como la temperatura y la humedad del aire, así como la velocidad del flujo de aire.

- Inversores de Flujos (Ventiladores Reversibles): En algunos casos, los ventiladores auxiliares pueden tener capacidad de reversión para extraer el aire contaminado en lugar de introducir aire fresco.
- Sistemas de Extracción Localizada: Dependiendo del trabajo, se pueden usar extractores de humo o polvo en zonas donde se genera mucha contaminación, como durante trabajos de perforación, voladuras, o soldaduras.

2.2.12.2 Diseño General del Funcionamiento

En el diseño de la ventilación auxiliar se enfoca en el aire que ingresa y se extrae y a través de su distribución hasta los frentes de trabajo (Gallardo, 2008).

2.2.12.3 Introducción de Aire Fresco

Los ventiladores principales proporcionan aire fresco en la red principal de ventilación de la mina. El sistema auxiliar toma ese aire y lo dirige a los frentes de trabajo mediante los ductos (Luque, 1998).

2.2.12.4 Extracción de Aire Viciado

Si el área está contaminada por gases o polvo, se pueden emplear ventiladores auxiliares para extraer el aire hacia puntos de escape o salida de la mina (Kingery, 1960).

2.2.12.5 Distribución de Aire

El aire limpio es distribuido por los conductos flexibles hasta el tajo o frente de trabajo. A medida que el equipo de trabajo avanza, se pueden ir extendiendo los ductos o reubicando los ventiladores según sea necesario (Mutmansky, 2000).

2.2.12.6 Beneficios del Sistema Auxiliar

En los sistemas de ventilación en minas subterráneas, contar con un sistema auxiliar es un beneficio, ya que la ventilación natural o principal no es suficiente para garantizar la seguridad del personal y el correcto funcionamiento de los equipos cuando se cuenta con un avance significativo en la mina. Estos beneficios son:

- Mejora la calidad del aire en zonas de difícil acceso.
- Mantiene los niveles de gases peligrosos bajo control.
- Reduce el riesgo de enfermedades ocupacionales relacionados con la ventilación deficiente.
- Flexibilidad para ajustarse a áreas en desarrollo o expansión.

2.2.13 Cálculo del caudal del aire

El cálculo del caudal de aire controla tanto los niveles de gases tóxicos como la temperatura. El caudal de aire depende de diversos factores, como el tipo de maquinaria utilizada, la cantidad de trabajadores, y los contaminantes generados. Dichos factores son:

2.2.13.1 Caudal Necesario para Número de Personas

Según el Decreto Supremo N° 024-2016-EM, se establece un caudal mínimo de aire fresco que debe ser suministrado por persona en el frente de trabajo se utilizan rangos entre 2.5 m³/min a 6 m³/min por persona, pero el cálculo general viene de la fórmula:

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

Q_{Tr} = Cantidad de aire total para personas (m³/min).

F = Cantidad de aire mínimo por persona (m³/ min) * (R.S.S.O).

N = Número de personas laborando.

El aire es muy distinto en las diferentes altitudes donde se encuentran las unidades mineras. Las cuales nos indica que:

- De 1500 a 3000 metros sobre el nivel del mar, se incrementa a 40% = 4.0 m³/min.
- De 3000 a 4000 metros sobre el nivel del mar, se incrementa a 70% = 5.0 m³/min.
- Por encima de 4000 metros sobre el nivel del mar, se incrementa a 100% = 6.0 m³/min.

2.2.13.2 Caudal Necesario para Equipo Diésel

Los que funcionan con motores diésel, genera gases nocivos como monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), por lo que es esencial ventilar adecuadamente estas emisiones.

$$Q_2 = K * N \quad (2)$$

Q_2 = Cantidad de aire necesario para equipo diésel.

K = 3.0 (m³/min) cantidad necesaria para cada HP.

N = número de HP de los equipos en la mina.

2.2.13.3 Caudal en el uso de Explosivos

Se utilizan mayormente dinamita o ANFO las cuales sus valores son 20 m/min y 25 m/min respectivamente.

$$Q_3 = V * n * A \quad (3)$$

Q_3 = Cantidad de aire necesario para diluir contaminantes por explosivo.

V = velocidad de aire 20 m/min (dinamita) 25 m/min (ANFO).

n = número de niveles de la mina.

A = Área promedio de la sección de las labores en m^2 .

2.2.13.4 Caudal para Condiciones Ambientales Optimas

Para calcular el caudal de aire necesario para mantener condiciones ambientales óptimas, podemos usar la siguiente fórmula aproximada basada en la disipación de calor:

$$Q_4 = \frac{H}{\Delta T * C_p * \rho} \quad (4)$$

Q_4 = Caudal de aire necesario (m^3/min)

H = Calor generado por la maquinaria y procesos (kW)

ΔT = Diferencia de temperatura entre el aire de entrada y el aire de salida ($^{\circ}C$), Se suele usar $5-10^{\circ}C$ dependiendo del diseño del sistema de ventilación

C_p = Capacidad calorífica específica del aire (aproximadamente $1.005 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}C$)

ρ = Densidad del aire (aproximadamente 1.2 kg/m^3 a nivel del mar)

2.2.13.5 Caudal por Filtraciones o Fugas

Este cálculo necesario para la sumatoria de todos los caudales en porcentaje, son lo que realmente se está necesitando a partir de todas las variables anteriores.

$$Q_{F_u} = 15\% * Q_{T_1} \quad (5)$$

Donde:

$$Q_{T_1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (6)$$

Finalmente, el cálculo total del aire se da:

$$Q_{Total} = Q_{T_1} + Q_{F_u} \quad (7)$$

2.2.14 Normas Legales

Las normas legales para la ventilación de minas en Perú están establecidas en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, D.S N°023-2017-EM. Este reglamento tiene como objetivo prevenir incidentes peligrosos como enfermedades ocupacionales relacionadas con la falta de aire limpio. En el artículo 246 nos menciona que titular de actividad minera velará por el suministro de aire limpio a las labores de trabajo de acuerdo a las necesidades del trabajador, de los equipos y para evacuar los gases, humos y polvo suspendido que pudieran afectar la salud del trabajador, así como para mantener condiciones termo-ambientales confortables. Todo sistema de ventilación en la actividad minera, en cuanto se refiere a la calidad del aire, deberá mantenerse dentro de los límites de exposición ocupacional para agentes químicos de acuerdo al ANEXO N.º 15 y lo establecido en el Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo, aprobado por Decreto Supremo N.º 015-2005-SA o la norma que lo modifique o sustituya. De este artículo parte los siguientes cumplimientos:

- Al inicio de cada jornada o antes de ingresar a labores mineras, en especial labores ciegas programadas, como son chimeneas y piques, deberá realizar mediciones de gases de monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, oxígeno y otros, de acuerdo a la naturaleza del yacimiento, al uso de explosivos y al uso de equipos con motores petroleros, las que deberán ser registradas y comunicadas a los trabajadores que tienen que ingresar a dicha labor.
- En todas las labores subterráneas se mantendrá una circulación de aire limpio y fresco en cantidad y calidad suficientes de acuerdo con el número de trabajadores, con el total de HPs de los equipos con motores de combustión interna, así como para la dilución de los gases que permitan contar en el ambiente de trabajo con un mínimo de diecinueve puntos cinco por ciento (19.5%) de oxígeno.
- Las labores de entrada y salida de aire deberán ser absolutamente independientes. El circuito general de ventilación se dividirá en el interior de las minas en ramales para hacer que todas las labores en trabajo reciban su parte proporcional de aire fresco, evitando toda recirculación de aire.

- Cuando la ventilación natural no sea capaz de cumplir con los artículos precedentes, deberá emplearse ventilación mecánica, instalando ventiladores principales, secundarios o auxiliares, según las necesidades.
- Los ventiladores principales, secundarios y auxiliares serán instalados adecuadamente, para evitar cualquier posible recirculación del aire. No está permitido que los frentes de desarrollo, de chimeneas y labores de explotación sean ventiladas con aire usado.
- En labores que posean sólo una vía de acceso y que tengan un avance de más de sesenta metros (60 m.), es obligatorio el empleo de ventiladores auxiliares. En longitudes de avance menores a sesenta metros (60 m.) se empleará también ventiladores auxiliares sólo cuando las condiciones ambientales así lo exijan.
- En las labores de desarrollo y preparación se instalará mangas de ventilación a no más de quince metros (15 m.) del frente de disparo.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Ventilación: Proceso de introducir aire fresco hacia el interior de la mina y expulsar el aire viciado o contaminado. Este proceso puede ser natural o mecánico. (Chacon, 2014).

Ventilación Natural: Proceso de renovación de aire mediante diferencias de presión o temperatura, sin intervención mecánica. Se produce a través de aberturas como ventanas, puertas o conductos naturales. (Hartman, 1997).

Ventilación Mecánica: Movimiento de aire controlado mediante dispositivos mecánicos como ventiladores, extractores o sistemas de aire acondicionado. (Larry J. K. Mutmansky, 2002).

Ventiladores: Dispositivos mecánicos utilizados para mover aire y crear un flujo de ventilación. Pueden ser axiales, centrífugos o de otro tipo, dependiendo de su diseño y aplicación. (Zitrón, 2010).

Contaminantes: Sustancias nocivas o peligrosas en el aire, como polvo, gases, vapores y microorganismos. (Valle, 2017).

Sistemas de Ventilación: Conjunto de equipos y componentes diseñados para mover, filtrar y controlar la calidad del aire en espacios cerrados. (Aranguaren, 2017).

Caudal de Aire: Cantidad de aire que fluye a través de un punto en un sistema de ventilación en un tiempo determinado. Se mide en metros cúbicos por minuto (m^3/min). (Yoman, 2017).

Diferencia de Temperatura: Variación de temperatura entre el aire fresco que ingresa a un espacio y el aire que sale después de haber sido utilizado. Se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). (Ramani, 2004).

Calor Generado: Cantidad de energía térmica que produce un equipo o maquinaria durante su funcionamiento, generalmente medida en kilovatios (kW). (Larry J. K. Mutmansky, 2002)

Capacidad Calorífica Específica: Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de un material en un grado Celsius ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$). Para el aire, se estima en aproximadamente. (Luque, 1998).

Densidad del Aire: Masa de aire por unidad de volumen, típicamente medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). La densidad del aire es aproximadamente $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ a nivel del mar. (Ramirez, 2005).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La mina subterránea se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca, provincia de Cajabamba, distrito de Cachachi, carretera San Marcos – Cajabamba Km.20. La mina “El Halcón” perteneciente a la concesión minera “Acumulación Shahuindo”, comprende un área de 2.61 hectáreas. Geográficamente se ubica a cinco kilómetros de la mina Shahuindo, a una altitud que varía entre los 2800 a 3400 m.s.n.m.

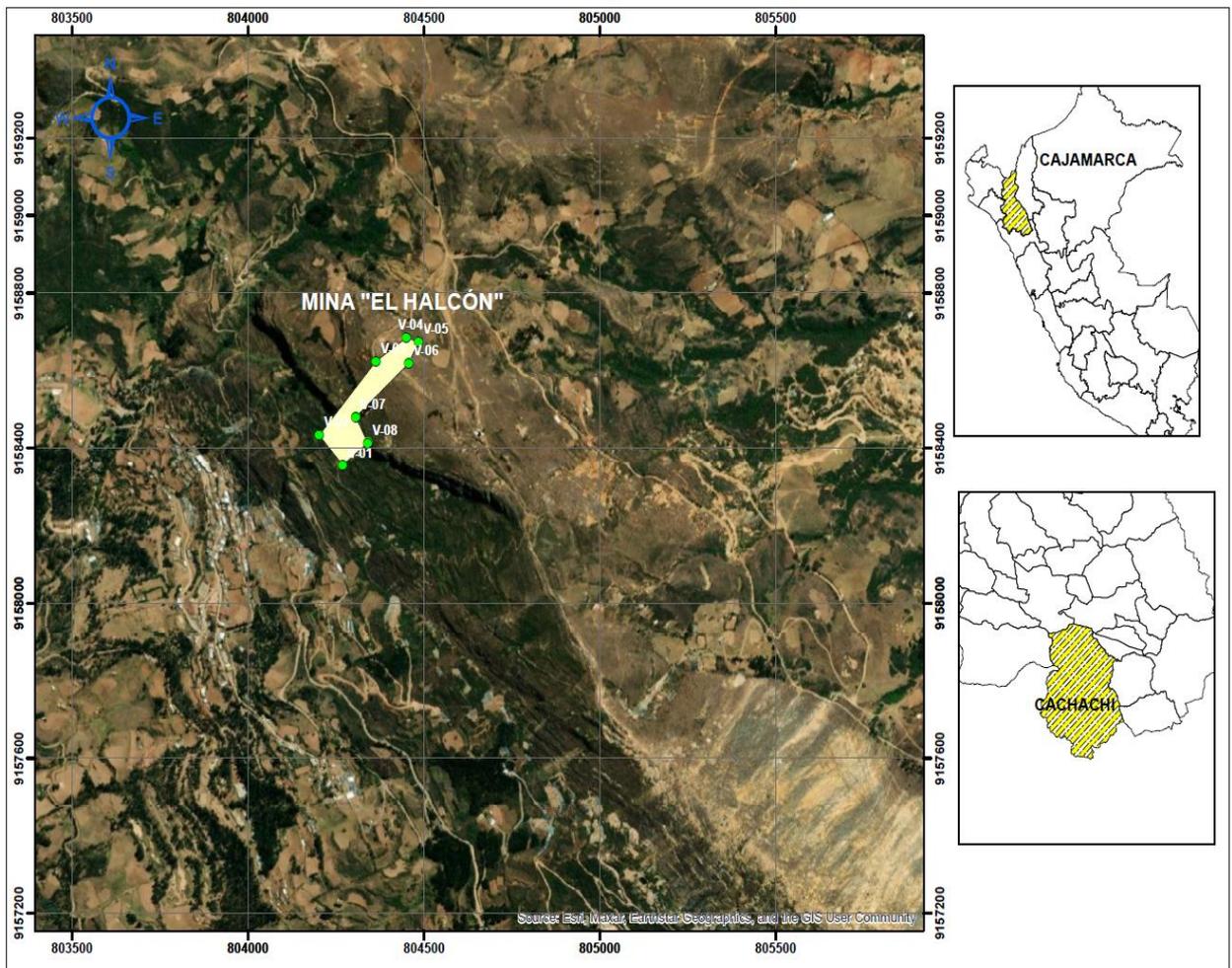


Figura 5: Ubicación de la mina "El Halcón".

3.1.1 Accesibilidad

El acceso para la mina subterránea se puede partir de la ciudad de Cajamarca, siguiendo la ruta a la provincia de Cajabamba, esta ruta es en su mayoría una carretera asfaltada, sin embargo, en el tramo de la carretera Cajabamba a Cachachi, se tiene ciertos tramos que no se encuentran asfaltadas. Esta vía tiene una longitud aproximada de 132.2 Km desde Cajamarca hasta el distrito de Cachachi.

Tabla 6: Acceso al área de la mina "El Halcón"

Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo de Vía
Cajamarca - Cachachi	118 km	3h 10 min	Asfaltada
Cachachi - Mina	14 km	40 min	No Asfaltada

Fuente: Elaboración propia.

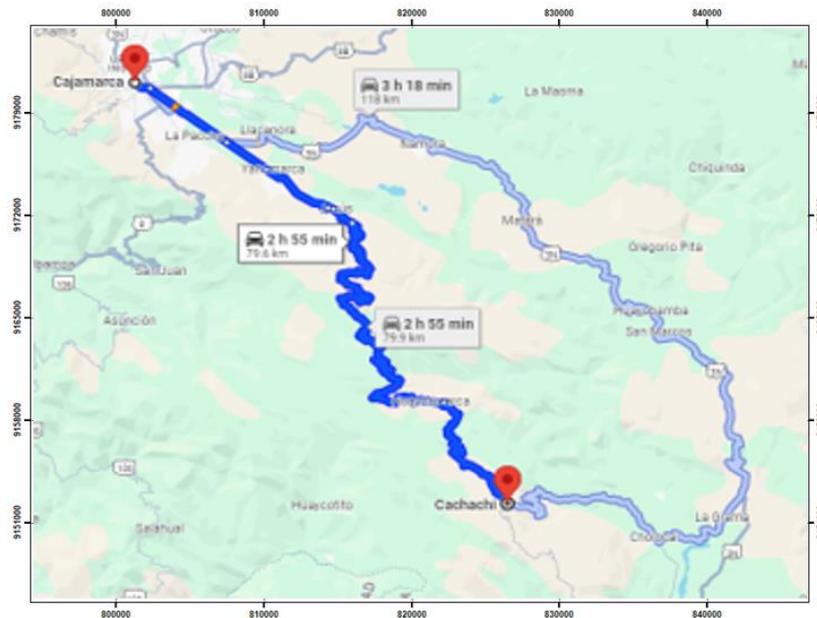


Figura 6: Rutas hacia la mina Cajamarca – Cachachi.

Fuente: Google Earth, 2024



Figura 7: Vía asfaltada que nos dirige distrito de Cachachi.

Fuente: Google Earth, 2024

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

La zona donde se sitúa la mina "El Halcón" presenta una geología que incluye las formaciones Chimú y Santa. Estas formaciones están compuestas de diferentes tipos de rocas como areniscas, cuarcitas, lutitas, calizas margosas y areniscas de color gris oscuro, además de mezclas de areniscas con lutitas grises en matrices de tonos rojizos, violáceos y rosados. Esta estructura geológica se manifiesta a través de un sistema de vetas que tienen una orientación noreste, cortando el anticlinal del cerro Algamarca que forma parte del grupo Goyllarisquízga. A medida que se alejan de la cresta del cerro, los estratos presentan una inclinación menos pronunciada. Asimismo, se puede observar que también están dispuestos en el flanco oeste del anticlinal, haciendo que el eje tenga una dirección de $N165^\circ$ a 130° , lo que indica un control estructural debido a las fallas que existieron antes de la mineralización en Algamarca (Rivera Cornejo, 2007).

3.2.1 Formación Chimú

Está compuesta en la parte inferior por lutitas y areniscas cuarzosas, mientras que en la parte superior presenta una notable secuencia de areniscas cuarzosas blancas en bancos gruesos. Estas areniscas tienen un tamaño de grano que varía de mediano a grueso y su grosor es de aproximadamente 600 metros. Por lo tanto, se considera que es una roca de buena calidad y competente, ya que se encuentra en relaciones estratigráficas del

Valanginiano inferior a medio, situándose sobre la formación Chicama del Títonio y debajo de la formación Santa del Valanginiano superior (Rodríguez Mejía, 2008).



Figura 8: Formación Chimú

3.2.2 Formación Santa

Esta formación consiste en capas de limolitas muy compactas de un color oscuro, con intercalaciones de lutitas de textura fina y aspecto laminado, que varían en tonos de gris a plomo, además de calizas gris verdosas. El grosor de estas capas varía entre 100 y 150 metros. Se encuentra por encima de la formación Chimú y debajo de la formación Carhuaz, mostrando aparentemente una discordancia paralela en ambos casos (Castrejón, 2024).



Figura 9: Formación Santa

Tabla 7: Unidades Geológicas de la mina "El Halcón".

Código	Descripción Geológica	Litología
Ki-chi	Formación Chimú	Areniscas cuarzosas de color blanquecino de grano medio
Ki-sa	Formación Santa	Estratos de limonita compactadas de color negruzco intercalada con lutitas de textura laminar de grano fino, coloración de grisáceo a plumizo.

3.3 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.3.1 Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación

El tipo de la investigación es aplicada por los procesos y sistemas proporcionando soluciones tangibles y prácticas que pueden ser implementadas en un plazo determinado. El nivel de la investigación es exploratoria y explicativa, estas dos metodologías permiten describir detalladamente los fenómenos estudiados, y también comprender su funcionamiento interno y las razones detrás de su ocurrencia.

El diseño de esta investigación es no experimental porque se basa en la observación y análisis de los parámetros actuales del sistema de ventilación de la mina del nivel 0, veta cero, sin manipular directamente las variables en estudio.

El método utilizado es Inductivo – Deductivo al recopilar datos concretos y observaciones específicas en este caso es sobre el funcionamiento actual del sistema de ventilación, como mediciones de flujo de aire.

3.3.2 Población de Estudio

Mina El Halcón.

3.3.3 Muestra

La muestra a estudiar es denominada Veta 0.

3.3.4 Unidad de Análisis

La unidad de análisis de la presente investigación está relacionado a los parámetros técnicos que influyen en el sistema actual de ventilación.

3.3.5 Definición de Variables

3.3.5.1 Independiente

Ventilación Subterránea: evaluación del rendimiento, calidad, caudal, características técnicas de un sistema de ventilación y sus funciones principales.

3.3.5.2 Dependiente

Eficiencia y parámetros físicos del sistema de ventilación.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Técnicas

Las técnicas aplicadas presentes en la investigación es la observación directa con recolección de información de campo, la cual incluyen fichas de observación, dichas fichas permiten registrar los datos de los caudales obtenidos en mina y análisis documental, la cual contiene planos del diseño del nivel 0, número de trabajadores, numero equipos entre otra información correspondiente a la mina subterránea.

3.4.2 Instrumentos, Materiales y Equipos

Para la presente investigación los instrumentos tomados son clasificados entre gabinete y campo las cuales son:

Gabinete:

- Computadora de escritorio, laptop: para registro de los datos adquiridos y posteriormente evaluados
- Software Microsoft Word, Excel, ArcGIS 10.8, VENTSIM, AutoCAD 2014: Para creación de planos, para la simulación del sistema de ventilación y para el diseño digital de la mina respectivamente.
- Fichas de Registro: Para anotar la evidencia recolectada.
- USB: Para almacenar la data adquirida.

Campo:

- GPS: Para la ubicación de puntos, tanto de ventiladores como metros de avance.
- Cámara Fotográfica: Utilizada para evidencia registrada en campo.
- Libreta de campo: Para anotaciones de datos reales en la mina.
- Epp: Equipo de Protección Personal de uso en la mina.
- Anemómetro EXTECH: Para calcular el caudal del aire.
- Termómetro EXTECH: Para calcular la temperatura ambiente de la mina subterránea.

3.5 ANALISIS, INTERPRETACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE DATOS

3.5.1 Identificación del Avance y Frente de Trabajo

Se definió el avance de la mina subterránea, la cual consta con 270 metros, de la cual la investigación se está realizando específicamente en la veta 0. Para no tener ningún inconveniente se comunicó al personal de la mina para realizar las actividades de reconocimiento y cálculos posteriores, sin interrumpir las labores realizadas.

3.5.2 Identificación de Puntos Específicos para toma de Datos

Se tomó en cuenta puntos de manera específica, tanto para la toma de datos, como para la ubicación del ventilador instalado en la mina subterránea. Asimismo, se están tomando las coordenadas necesarias para cálculo del caudal del aire.

3.5.3 Generación de Datos

Los datos generados de la mina subterránea son a través de los equipos requeridos para el caudal, como para la velocidad de aire en el interior de la mina (en este caso se tomó el anemómetro), y los datos tomados en diferentes puntos (bocamina y frente de trabajo) así como temperatura en dichos puntos.

También se consideró el acceso, la cual debe afrontar varios obstáculos por cambios de dimensiones de las secciones, según los avances requeridos, así como también se consideró calcular el aire requerido.

3.5.4 Generalidades de la Mina “El Halcón”

La mina “El Halcón”, actualmente viene desarrollando las actividades artesanales con un avance de 270 metros lineales de labor subterránea, este avance del nivel denominado 0, sigue una veta específica la cual es denominada veta 0, el objetivo principal de la mina es extraer el cuerpo mineralizado utilizando técnicas de perforación, voladura y acarreo.

3.5.4.1 Componentes

Sus componentes presentes en la mina “El Halcón” son propias de una mina subterránea artesanal. La cual se encuentran la mayor parte en la zona exterior:

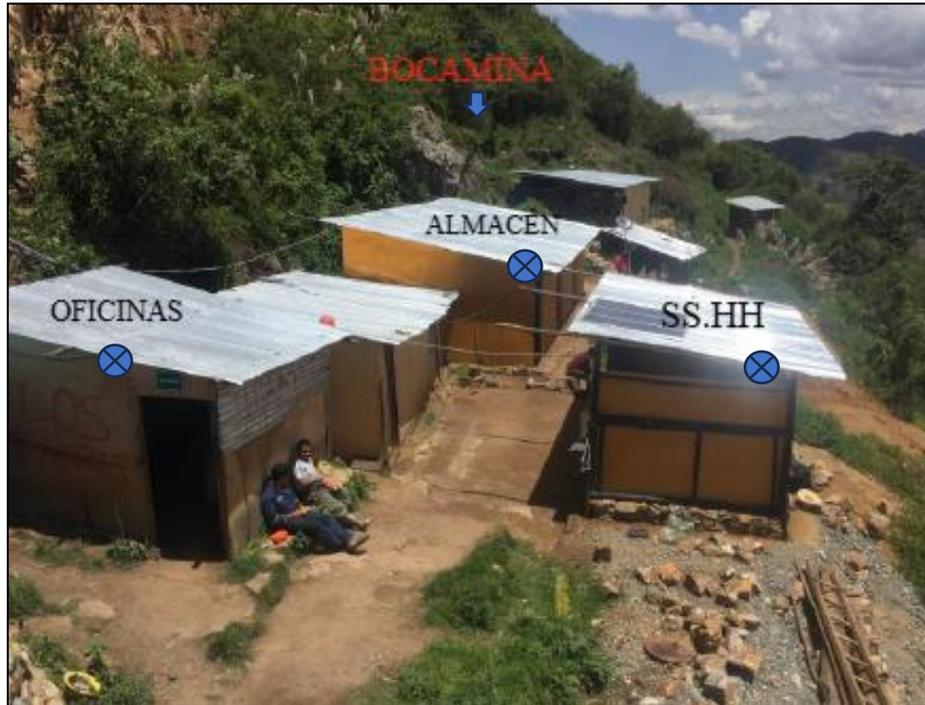


Figura 10: Componentes en superficie.

En interior de la mina, se tiene componentes propios, ya que, al tener un avance significativo, se tiene procesos de las cuales demanda tiempo y reubicación de materiales.



Figura 11: Ventilador al interior de la mina.



Figura 12: Frente de trabajo.

3.5.4.2 Dimensiones y Ubicación del Nivel 0 y Veta 0

Las dimensiones del nivel 0 se emplearon secciones en arco de 2.30 m. de ancho x 2.74 m. de alto, en algunas secciones cambia su sección (ancho y altura), dado por el avance y el sostenimiento requerido.

Adicionalmente las medidas de la bocamina son 1.95 m. de ancho x 2.20 m. de alto.



Figura 13: Toma de medidas de la Bocamina.

3.6 PROCEDIMIENTO OPERATIVO DEL NIVEL 0 EN LA VETA 0

El proceso del nivel 0 dado el seguimiento de la veta 0 en el frente de trabajo consiste en:

Perforación en el Frente de Trabajo: Se realiza mediante Perforadoras neumáticas tipo JackLeg YT28 y YT29 mediante rotoperusión, con barrenos de 4 y 6 pies, utilizando agua y aire comprimido enviado desde las compresoras.

Uso de Explosivos: Estos son cargados con explosivos (dinamita) armados con detonador (Fulminante N°08) y guía de seguridad (mecha lenta) cuando es necesario se ayuda con Nitrato de Amonio embolsado, estos taladros son cargados individualmente por lo que el chispeo se realiza taladro por taladro.

Ventilación: Una vez realizado el quemado de los disparos, se producen gases nitrosos, estos son ventilados con la ayuda del ventilador aspirante.

Desatado: Realizada la voladura, esta deja rocas sueltas y atrapadas en diaclasas tipo cuña, presentando un riesgo para los colaboradores, por lo que con ayuda de las barras desquinchadoras (chotanas) se procede a desatar todas las rocas que presenten cierto riesgo de inestabilidad tanto en el frente de trabajo como en el techo de la labor.

Sostenimiento: En algunos sectores de la galería, se presentan zonas de fallas o de percolación de agua dejando inestable el techo de la labor por lo que se utiliza madera de eucalipto de 8 a 10 pulgadas por 1.90 m de altura, armando así, cuadros de madera cada 1.5 m. o 2 m. según requiera la labor, así mismo se utilizan puntales de madera de 6 a 8 pulgadas en las zonas de acceso, junto a sus guardas cabezas hechos con puntales y tablonces de 2 pulgadas.

Monitoreo de Gases: Terminada la ventilación, se tiene en cuenta el ambiente, de forma general si se visualiza aun presencia de gases, se ingresa con un detector de gases MSA.

Transporte y Acarreo: En cuanto al mineral económico, este queda en poco volumen debido al circado, este es llenado apilado en sacos mineros, para luego ser acarreado en los mismos carros mineros hacia la cancha de acopio.

Limpieza: El material suelto de la voladura, es decir el material estéril (Roca triturada), es cargado mediante palanas a los carros mineros (Z20) y este es extraído mediante riel, manualmente hasta la desmontera, donde es depositado.

Pallaqueo y Selección: El mineral económico extraído de interior mina es apilado en montones para luego ser seleccionado, llenando en sacos el material pasante por la malla,

luego el material no pasante es colocado en montones pequeños donde se realiza el pallaqueo manualmente con la ayuda de palanas chicas y llenando a sacos el mineral económico, el excedente de este es transportado a la desmontera mediante el uso de carretillas.

3.7 Sistema de Ventilación de la Mina “El Halcón”

La mina subterránea “El Halcón” tiene un sistema de ventilación que depende de un ventilador axial, la cual consta de 2 ubicaciones, el cono de descarga está ubicado a más 200 metros con respecto a la bocamina, y la campana de succión está ubicada a 240.5 metros con respecto a la bocamina. El flujo de aire fresco es actualmente apoyado por ventilación natural, aunque de manera limitada. Las condiciones actuales de este sistema de ventilación son deficientes, por lo que la ventilación natural no es suficiente para el avance presente.



Figura 14: Ubicación de la campana de succión.

3.7.1 Caudales de Aire Requeridos

Los caudales de aire requerido para las labores fueron calculados teniendo como base al ANEXO 38 del DS-024-2016-E.M. del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería y sus modificatorias.

En el cálculo de caudales de aire, se tomaron en cuenta, el caudal de aire necesario para el personal, el caudal de aire necesario para el uso de madera, caudal de aire necesario por uso de explosivos y el caudal de aire necesario por fugas.

3.7.1.1 Caudal de Aire Necesario para el Personal

El caudal necesario para el personal de acuerdo al ANEXO 38, se calcula con la siguiente formula:

$$Q_{Tr} = F * N \text{ en } (m^3/min)$$

Donde:

Q_{Tr} = Cantidad de aire total para personas (m^3/min).

F = Cantidad de aire mínimo por persona (m^3/min) * (R.S.S.O).

N = Número de personas laborando.

Tabla 8: Cantidad de aire mínimo según RSSO.

Desde	0 m.s.n.m.	1500 m.s.n.m.	Caudal	min.	$3m^3/min$
			es		
Desde	1500 m.s.n.m.	3000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$4m^3/min$
			es		
Desde	3000 m.s.n.m.	4000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$5m^3/min$
			es		
Desde	Superior de	4000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$6m^3/min$
			es		

3.7.1.2 Caudal de Aire Necesario para uso de Madera

El caudal de aire por uso de madera, en esta investigación en específico se da por la generación de polvo, la cual es considerable a la hora de su ventilación.

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

Donde:

Q_{Ma} = Cantidad de aire por uso de madera

u = Factor de producción de acuerdo a la escala establecida del artículo 252 del reglamento.

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

Tabla 9: Factor de Producción por uso de madera.

CONSUMO DE MADERA (%)	FACTOR DE PRODUCCION (m^3/min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 70	1.25

Fuente: Artículo 252 del DS-24-2016-EM, (2016).

3.7.1.3 Caudal Requerido por Temperatura en el Frente de Trabajo

La temperatura en el frente de trabajo supera a los límites proporcionadas por el artículo 252 del Reglamento, dicho caudal requerido se da por la siguiente fórmula:

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

Donde:

Q_{Te} = Caudal requerido por temperatura

V_m = Velocidad mínima

A = Área de labor promedio

N = número de niveles con temperatura mayor a 23°C. de acuerdo a lo establecido por el artículo 252 del Reglamento.

Tabla 10: Escala establecida de acuerdo al artículo 252.

Temperatura Seca (°C)	V_m (m/min)
Menos de 24°C	0.00
De 24°C a 29°C	30

Fuente: Artículo 252 del DS-24-2016-EM, (2016).

3.7.1.4 Caudal de Aire Necesario por Fugas

Para el cálculo del caudal por fugas se necesita la sumatoria del caudal de aire necesario para el personal, el caudal de aire necesario para consumo de madera y caudal de aire necesario por temperatura, finalmente multiplicando un 15 % de dicha sumatoria. Considerando lo anterior se tiene la fórmula:

$$Q_{Fu} = 15\% * (Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te}) CFM$$

3.7.1.5 Caudal de Aire Necesario por uso de Explosivos

Al contar con equipos eléctricos y no de equipos diésel, se considera el caudal de aire por uso de explosivos, dada por la siguiente formula:

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

Donde:

Q_{Ex} = Caudal de aire por uso de explosivos

A = Área promedio de labores en m²

V = Velocidad mínima de aire requerida según la norma en m/min. Ver *tabla 11*.

N = Número de niveles en voladura (siendo el único nivel 0)

3.7.2 Medición del Caudal de Aire real de la Mina “El Halcón”

Las mediciones realizadas, tanto para la velocidad de aire y secciones de la mina, se tomaron en cuenta 3 estaciones, la cual la principal diferencia es sus dimensiones y la estación 3 que es el frente de trabajo. Se utilizó un anemómetro EXTECH, para la velocidad de aire y temperatura.

La medición de aire fue hecha por el método de barrido, la cual consiste en medir las velocidades del aire en los distintos puntos de una forma que cubra la mayor parte de las secciones.

Para las secciones transversales, también se dividieron en 3 estaciones, principalmente es por el cambio de altura y ancho, de las cuales cambia por sostenimiento de madera, uso de puntales de madera, entre otros. Cada una teniendo su propia área promedio.

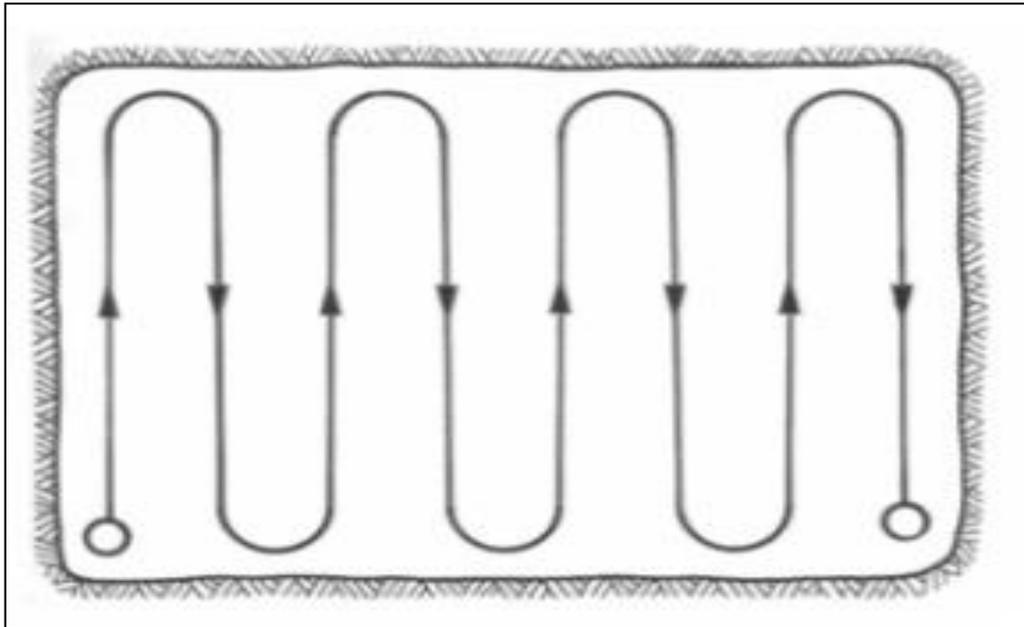


Figura 15: Método de Barrido.

Fuente: (Herbert, 2019)

En cada sección, la velocidad de aire se consideró un promedio de 4 velocidades de aire tomadas con el método de barrido. En las secciones transversales cambian de acuerdo al avance y al seguimiento de la veta 0.



Figura 16: Recopilación de datos con el método de barrido.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE RESULTADOS

4.1 CAUDAL DE AIRE REQUERIDO EN LA MINA

De acuerdo de la investigación se realizó el cálculo del caudal de aire requerido para las condiciones específicas de la mina en estudio, considerando factores como el número de trabajadores, el uso de madera en el sostenimiento, el impacto de la temperatura en el frente de trabajo, y las posibles fugas de aire a lo largo del sistema. Posteriormente, estos valores fueron comparados con el caudal de aire real disponible en la mina, obtenido a través de mediciones en campo permitiendo identificar y evaluar la capacidad del sistema de ventilación. Posteriormente, teniendo los datos de los caudales se evaluó la propuesta de implementar nuevos ventiladores con la ayuda del Software VENTSIM obtenido los siguientes resultados:

4.1.1 Cálculo del Caudal de Aire Necesario para el Personal

Teniendo la siguiente formula anterior vista, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{Tr} = F * N \text{ en } (m^3/min)$$

De acuerdo a la **tabla 8**:

Desde	0 m.s.n.m.	1500 m.s.n.m.	Caudal	min.	$3m^3/min$
			es		
Desde	1500 m.s.n.m.	3000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$4m^3/min$
			es		
Desde	3000 m.s.n.m.	4000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$5m^3/min$
			es		
Desde	Mayor a	4000 m.s.n.m.	Caudal	min.	$6m^3/min$
			es		

La mina “El Halcón” se ubica a 3112.3 m.s.n.m., entonces $F = 5 m^3/min$.

El número de personas laborando son 15 personas, de las cuales 10 están en las labores en interior mina.

De acuerdo a los datos:

$$Q_{Tr} = 5 m^3/min * 10$$

$$Q_{Tr} = 50 \text{ m}^3/\text{min}$$

Convirtiendo a CFM:

$$CFM = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 35.3147$$

$$Q_{Tr} = 1765.735 \text{ CFM}$$

4.1.2 Cálculo del Caudal de Aire Necesario para el uso de Madera

Teniendo la siguiente formula anterior vista, se obtiene lo siguiente:

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

De acuerdo a la **tabla 9**:

CONSUMO DE MADERA (%)	FACTOR DE PRODUCCION (m^3/min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 70	1.25

De acuerdo a los datos recopilados en campo, la generación de polvo y labores de sostenimiento nos ubican en el rango de 20% a 40%, lo cual el factor $u = 0.60$.

También la producción en toneladas métricas por guardia/día es de 2.0 tonelada. Este dato es brindado por el ingeniero a cargo de las labores.

Por lo tanto:

$$Q_{Ma} = 0.60 \text{ m}^3/\text{min} * 2.0$$

$$Q_{Ma} = 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$$

Convirtiendo a CFM:

$$CFM = 1.2 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 35.3147$$

$$Q_{Ma} = 42.377 \text{ CFM}$$

4.1.3 Cálculo del Caudal de Aire Necesario para Temperatura

En el frente de trabajo del nivel 0, siendo la única labor con una temperatura de 27.2 °C. se obtiene los siguientes datos:



Figura 17: Dato obtenido en el frente de trabajo.

Según la tabla 10:

Temperatura Seca (°C)	V_m (m/min)
Menos de 24°C	0.00
De 24°C a 29°C	30

El área del frente de trabajo es de 1.20 metros de ancho y 1.80 metros de alto, por lo cual su área promedio es de 2.16 m² por lo que se tiene de acuerdo a la formula:

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

$$Q_{Te} = 30 \frac{m}{min} * 2.16 m^2 * 1$$

$$Q_{Te} = 64.8 m^3/min$$

Convirtiendo a CFM:

$$CFM = 64.8 \frac{m^3}{min} * 35.3147$$

$$Q_{Te} = 2288.392 CFM$$

4.1.4 Cálculo del Caudal Requerido por Fugas

Según la formula anterior vista, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{Fu} = 15\% * (Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te}) CFM$$

$$Q_{Fu} = 15\% * (1765.735 \text{ CFM} + 42.377 \text{ CFM} + 2288.392 \text{ CFM})$$

$$Q_{Fu} = 15\% * (4460.271 \text{ CFM})$$

$$Q_{Fu} = 614.475 \text{ CFM}$$

4.1.5 Cálculo del Caudal Total Requerido

Considerando todos los cálculos se obtiene:

Tabla 11: Calculo del caudal total necesario.

DATOS OBTENIDOS	CAUDAL EN CFM
Caudal de aire necesario para el personal	1765.735 CFM
Caudal de aire necesario para uso de madera	42.377 CFM
Caudal de aire necesario para temperatura	2288.392 CFM
Caudal de aire por fugas	614.475 CFM
TOTAL	4690.979 CFM

4.1.6 Cálculo del Caudal por uso de Explosivos

Al contar con equipos eléctricos y no de equipos diésel, se considera el caudal de aire por uso de explosivos, dada por la siguiente formula:

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

Donde:

Q_{Ex} = Caudal de aire por uso de explosivos

A = Área promedio de labores en m²

V = Velocidad mínima de aire requerida según la norma en m/min ver en la **tabla 11**.

N = Número de niveles en voladura (siendo el único nivel 0)

Así mismo se halló el área promedio, teniendo el avance 270 metros, donde su altura 2.74 y su ancho 2.30, sus dimensiones cambian en el avance de 60 metros, teniendo 1.75 de ancho y 1.90 de alto, cambiando su forma el avance de 120 metros en 1.86 metros de ancho y 2.01 metros de altura, cambiando una última vez hasta el frente de trabajo un ancho de 1.60 metros y 2.10 metros. Para calcular el área promedio total de la galería, considerando los cambios de dimensiones en diferentes tramos del avance, se calculó el

área para cada tramo y luego obtener el promedio ponderado en función de la longitud de cada tramo, dando como resultado que el área promedio total del nivel 0 es **3.61m²**

Donde se tiene:

$$Q_{Ex} = 3.61 \text{ m}^2 * 30 \frac{\text{m}}{\text{min}} * 1 \text{ (Nivel 0)}$$

$$Q_{Ex} = 108.3 \text{ m}^3/\text{min}$$

Convirtiendo a CFM:

$$CFM = \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 35.3147$$

$$Q_{Te} = 3824.582 \text{ CFM}$$

4.1.7 Comparación de los Cálculos Obtenidos

Al obtener el caudal total requerido y el caudal necesario por uso de explosivos, estos son comparados con la finalidad de observar el mayor dato obtenido. Finalmente se tomó el dato del caudal total, ya que este nos ayudó a tomar las decisiones del ventilador que se podría implementar de acuerdo a los CFM obtenidos y verificado por el simulador Ventsim.

Tabla 12: Resultados de los caudales.

Caudal total de aire	4690.979 CFM
Caudal de aire necesario por uso de explosivos	3824.582 CFM

Por lo tanto, el **caudal total requerido** para la mina “El Halcón” es **$Q_{final} = 4690.979 \text{ CFM}$**

4.2 Caudal Actual en la Mina “El Halcón”

Considerando el caudal total requerido, se procede a calcular el caudal real de la mina, para este cálculo se consideró las 3 estaciones, con sus diferentes dimensiones, obteniendo los datos reales.

4.2.1.1 Mediciones Reales en el Nivel 0

Los cálculos comprenden desde la bocamina hasta el frente de trabajo avance.

Tabla 13: Datos obtenidos en campo.

Velocidad del Aire en m/s.								
Avance	Área	V1	V2	V3	V4	V _{prom.}	Caudal (CFM)	T °C
30 metros	4.29 m ²	0.40	0.38	0.36	0.34	0.37	3363.301	20.3
45 metros	4.01m ²	0.32	0.31	0.30	0.30	0.31	2633.982	21.3
55 metros	3.95 m ²	0.29	0.25	0.22	0.21	0.24	2008.700	22.2
65 metros	3.84 m ²	0.20	0.18	0.17	0.15	0.17	1383.206	23.1
75 metros	3.54 m ²	0.14	0.11	0.10	0.10	0.11	825.092	24.0
88.7 metros	3.50 m ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	24.1
Frente de trabajo	3.36 m ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	27.2

Tabla 14: Cálculo de la velocidad promedio total obtenido en el nivel 0.

ÁREA PROMEDIO	VELOCIDAD PROMEDIO TOTAL
3.83 m ²	0.2 m ² en 75 metros

4.3 PROPUESTA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN SEGÚN CÁLCULOS

Debido a la evaluación de los caudales de aire, se identificó la deficiencia del actual sistema de ventilación de la mina “El Halcón” de acuerdo a su avance. Se evidencia que el flujo de aire a partir de los 75 metros es nulo, por lo que la mina necesita de una ventilación mecánica de manera urgente. Para optimizar dicho sistema en el Software VENTSIM, se tomó en consideración los datos reales, los ventiladores auxiliares instalados de acuerdo a su ubicación.

4.3.1 Creación del Sistema de Ventilación Real en el Software Ventsim

Según los planos generales de la mina “El Halcón” (*Ver Anexo 1*), se procede a crear las galerías y el pique presente de acuerdo a lo real de los avances. Se tomo en consideración avances con presencia de flujo de aire y la construcción de la bocamina:

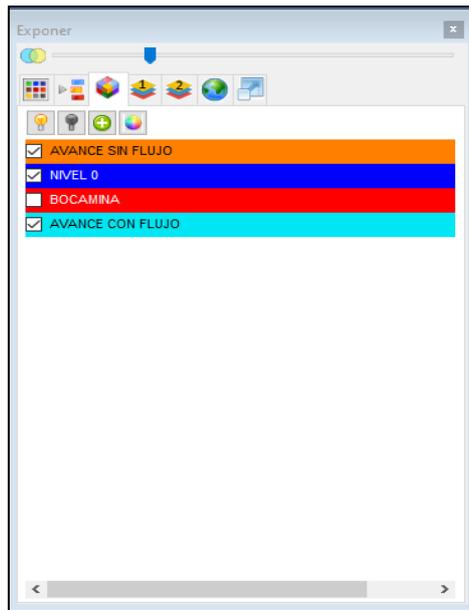


Figura 18: Creación de las galerías según los datos obtenidos.

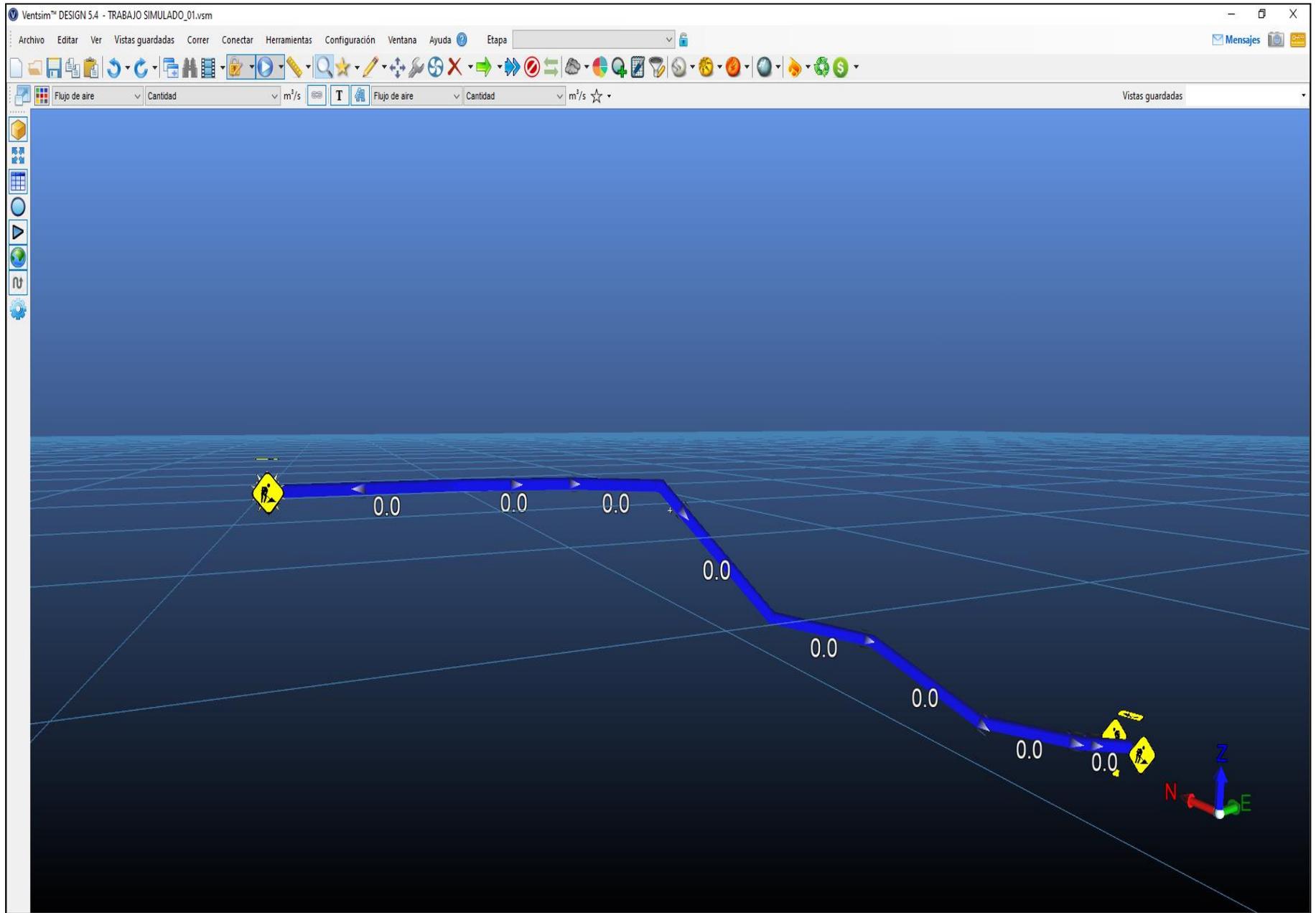


Figura 19: Simulación del sistema de ventilación en el Software VENTSIM.

4.3.2 Incorporación de Ventiladores Auxiliares

Esta incorporación se basa en datos de un ventilador auxiliar real en una simulación del Software Ventsim para evaluar su impacto en el sistema de ventilación de la mina “El Halcón”. Este proceso implica replicar las características específicas del ventilador, como su curva de desempeño, capacidad y eficiencia, en el modelo digital. El objetivo es analizar cómo mejora el sistema de ventilación a través de los flujos de aire carentes dentro del nivel 0.

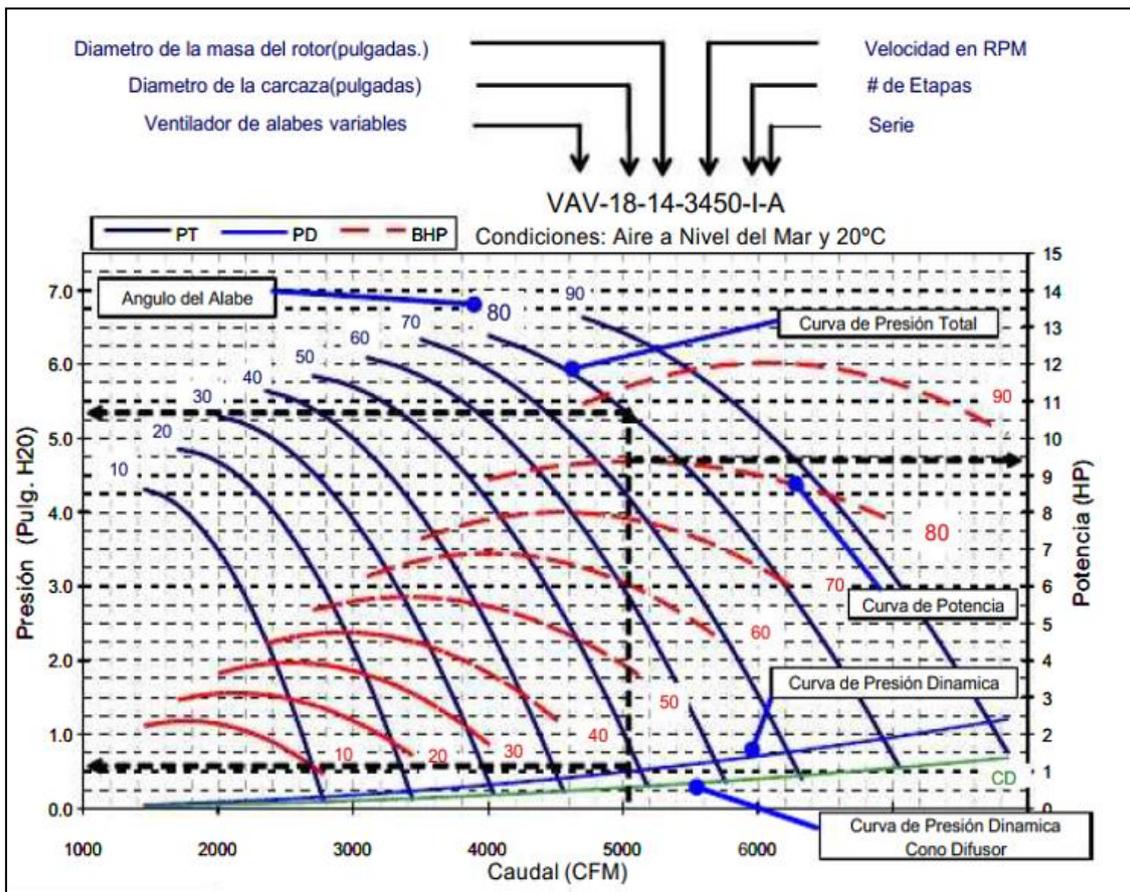


Figura 20: Curvas característica.

Fuente: (Airtec, 2017)

4.3.2.1 Elección de Condiciones del Ventilador

Según el cálculo de los caudales de aire, se procede a seleccionar ventilador basado en las condiciones específicas de flujo de aire medidas en CFM, presión estática y potencia requeridas para el sistema de ventilación de la mina subterránea. Estas condiciones son fundamentales para asegurar que el ventilador elegido pueda proporcionar el caudal adecuado de aire, superando las resistencias del sistema de ventilación de la mina "El Halcón" y operando de manera eficiente dentro de los parámetros de potencia disponibles. Con esta elección, se busca garantizar que el ventilador cumpla con las necesidades de ventilación de las distintas secciones de la mina, optimizando su rendimiento.

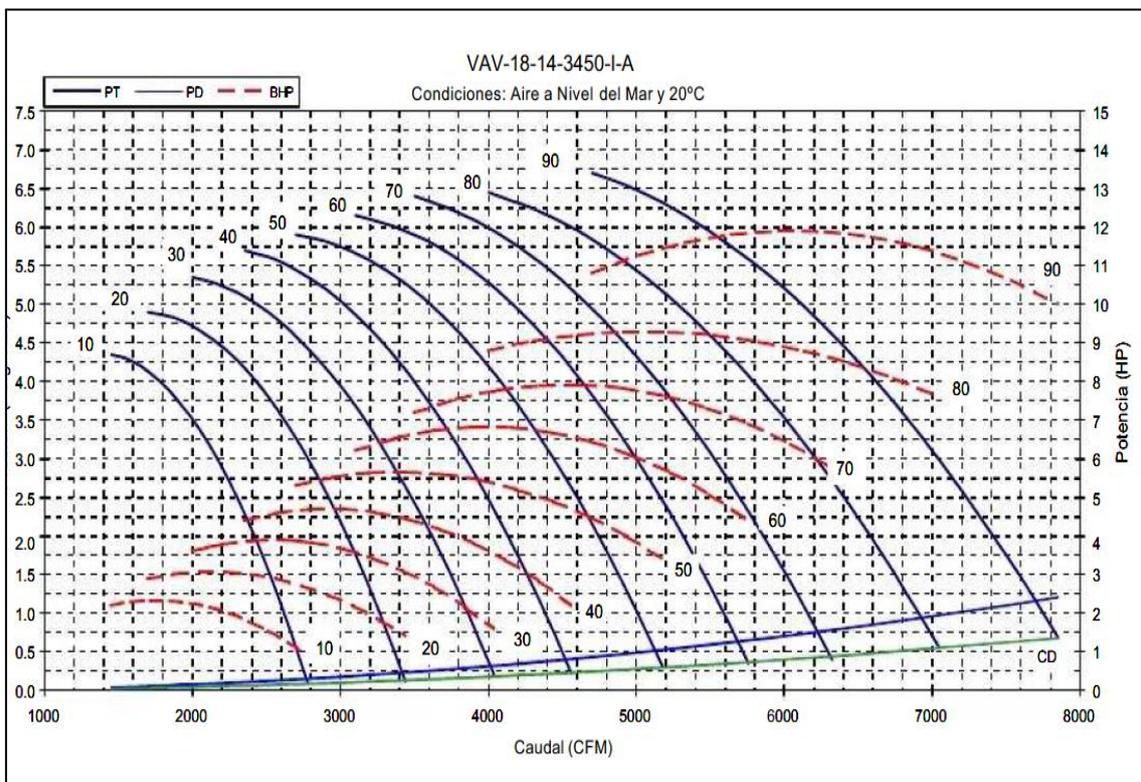


Figura 21: Condiciones del ventilador incorporado.

Fuente: (Airtec, 2017)

4.3.2.2 Digitalizador de Ventilador en el Software Ventsim

Según las condiciones elegidas, nos informa que no son mayores a 8000 CFM, se procede a digitalizar las curvas en el Software VENTSIM, definiendo las regiones permitiendo proporcionar manualmente valores mínimos y máximos de la región de gráfico.

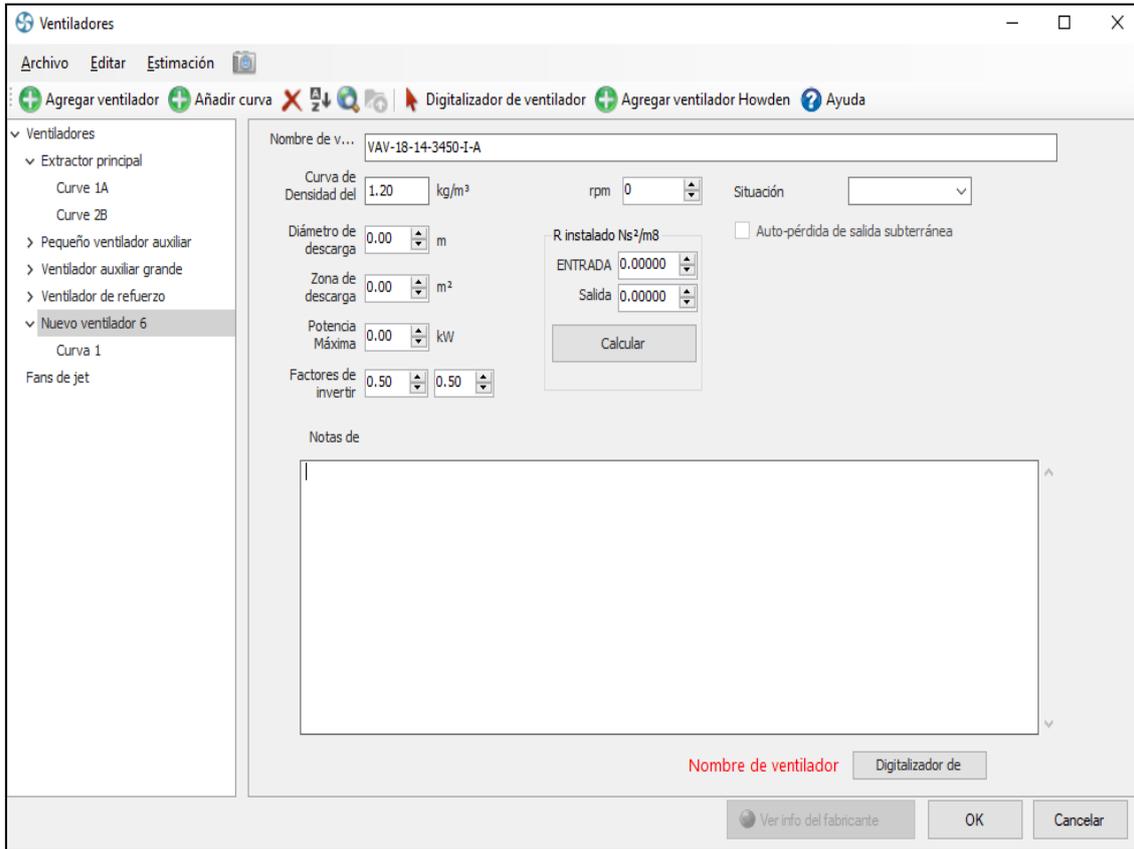


Figura 22: Ventilador utilizado VAV-18-14-3450-II-A.

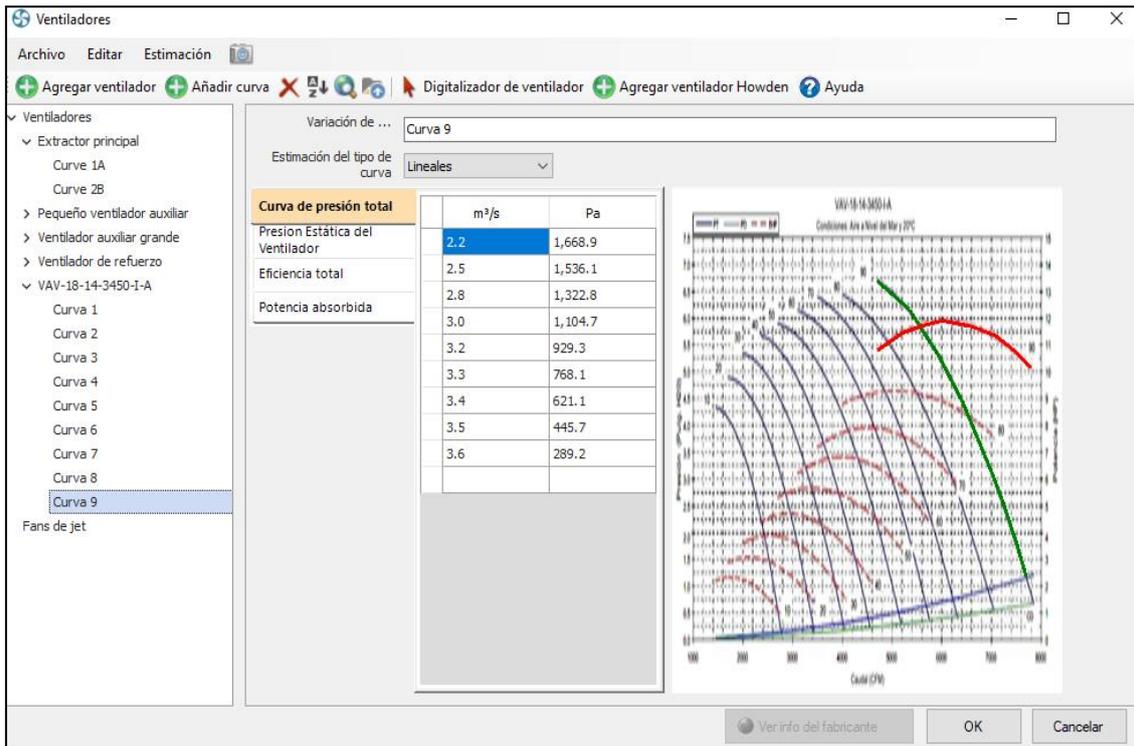


Figura 25: Curvas totales del ventilador.

4.3.3 Elección de Curvas del Ventilador

La elección de curvas del ventilador garantiza que el ventilador funcione de manera eficiente y cumpla con los requisitos del sistema de ventilación. Las curvas del ventilador representan su desempeño en términos de caudal (Q), presión (P), potencia (W) y eficiencia (%), y su elección depende de varios factores clave, en la simulación se consideró 9 curvas:

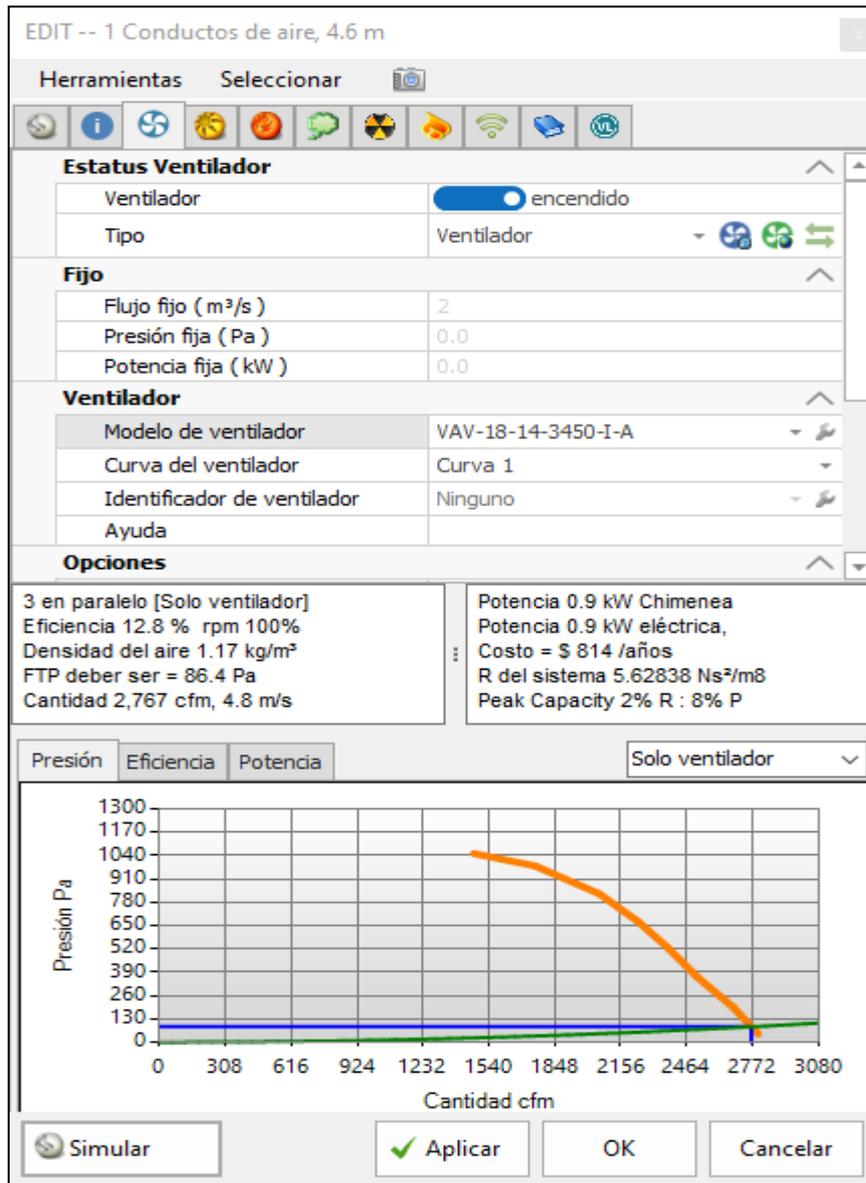


Figura 26: Curva característica 1.

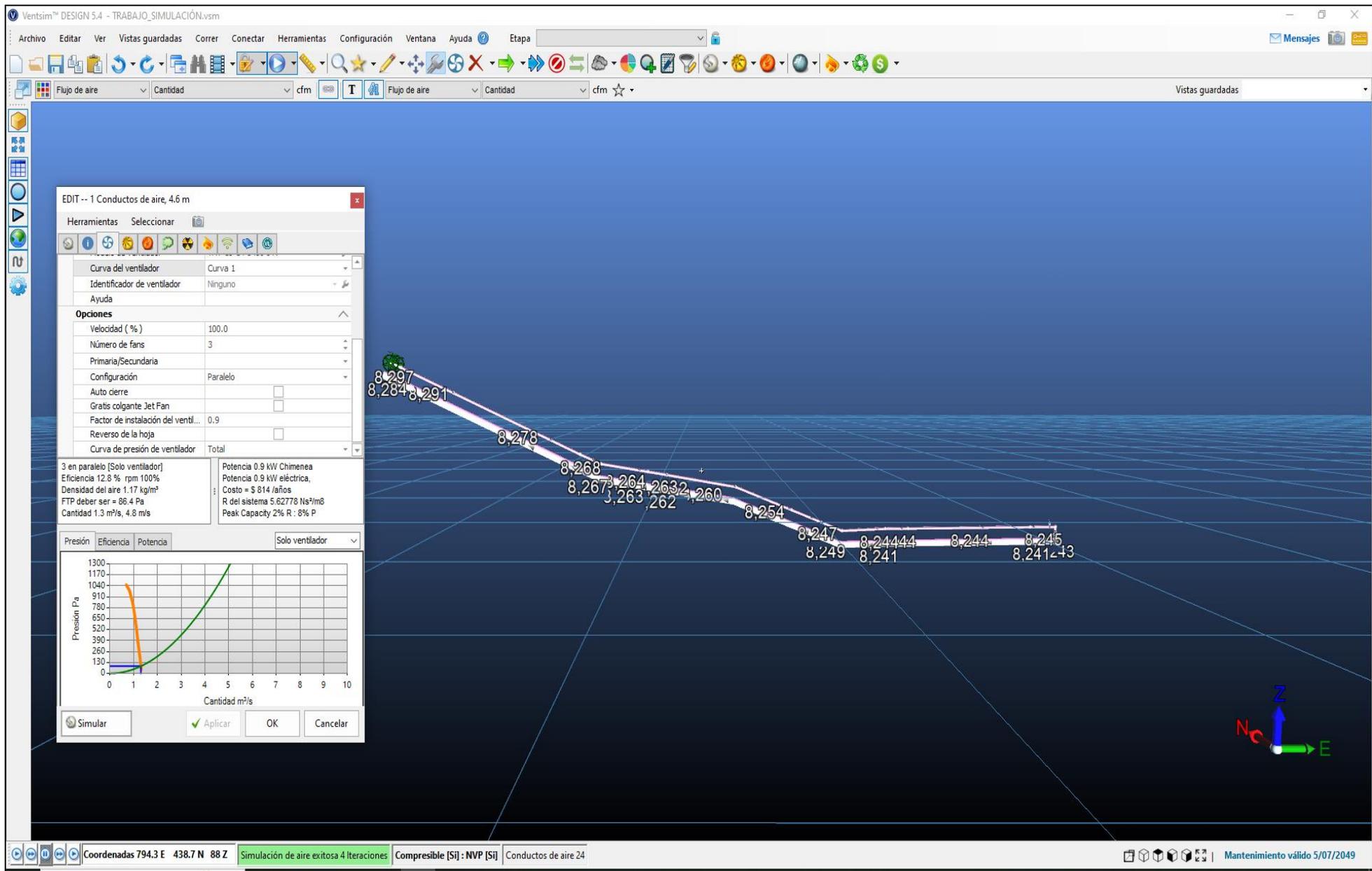


Figura 27: Sistema de ventilación simulado 01

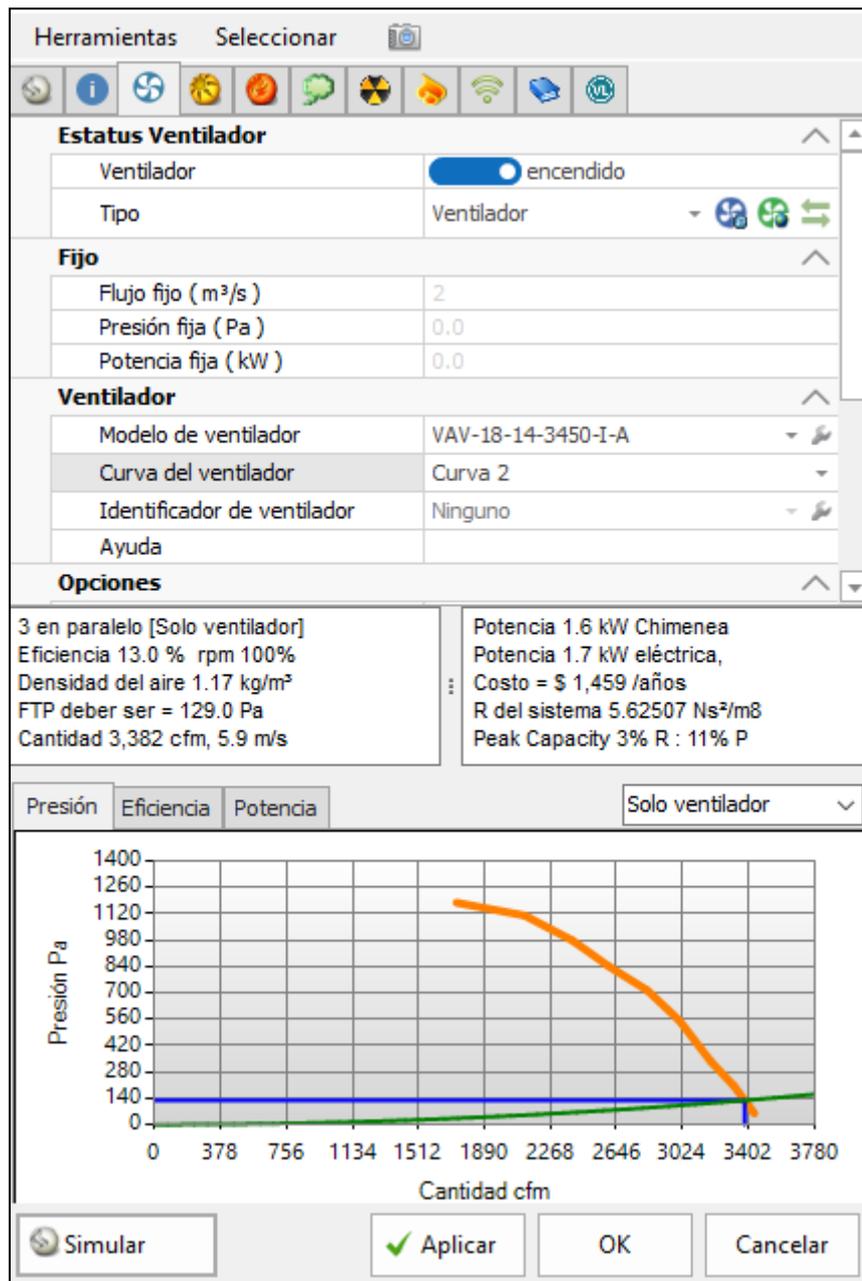


Figura 28: Curva característica 2.

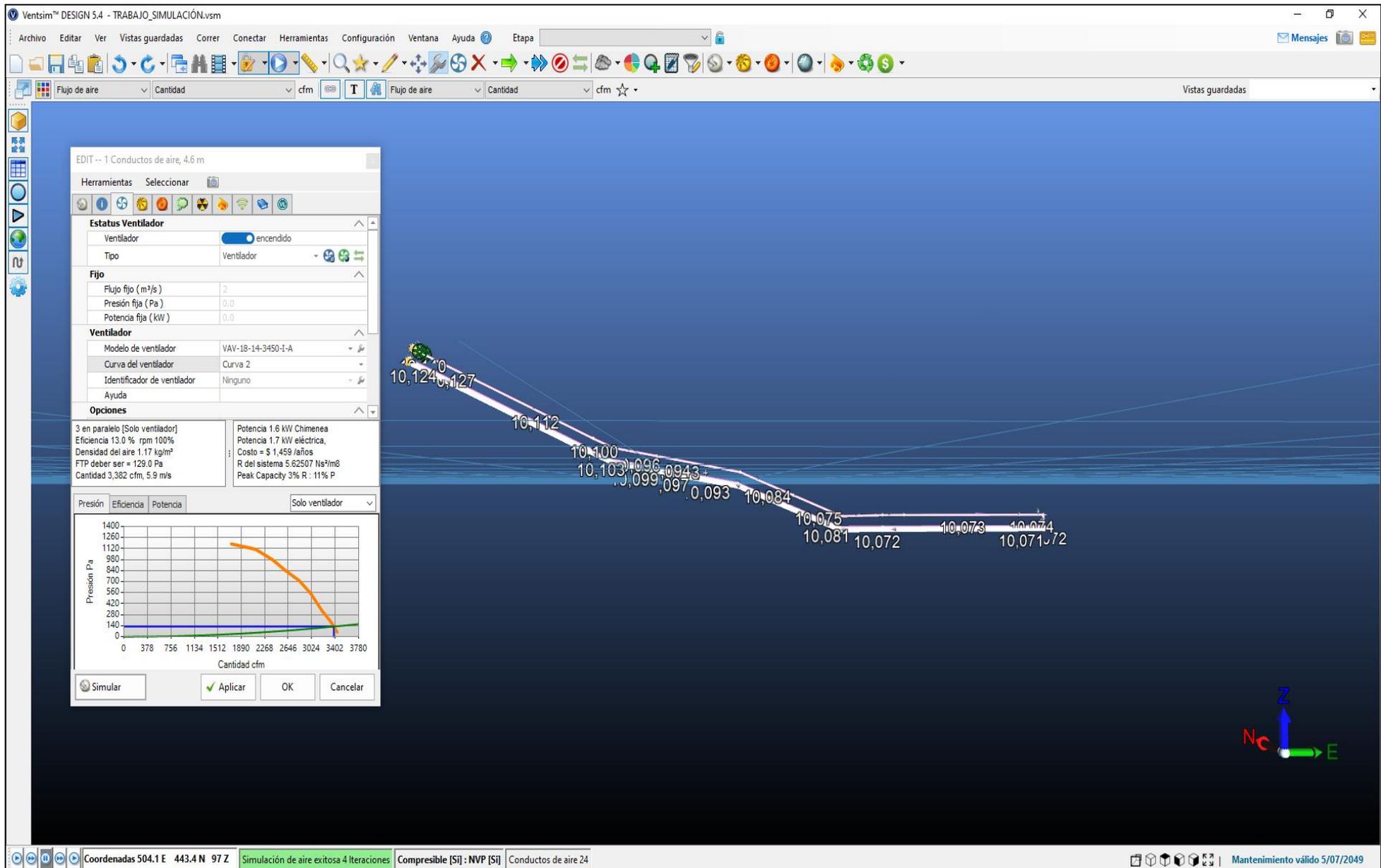


Figura 29: Sistema de ventilación simulado 02.

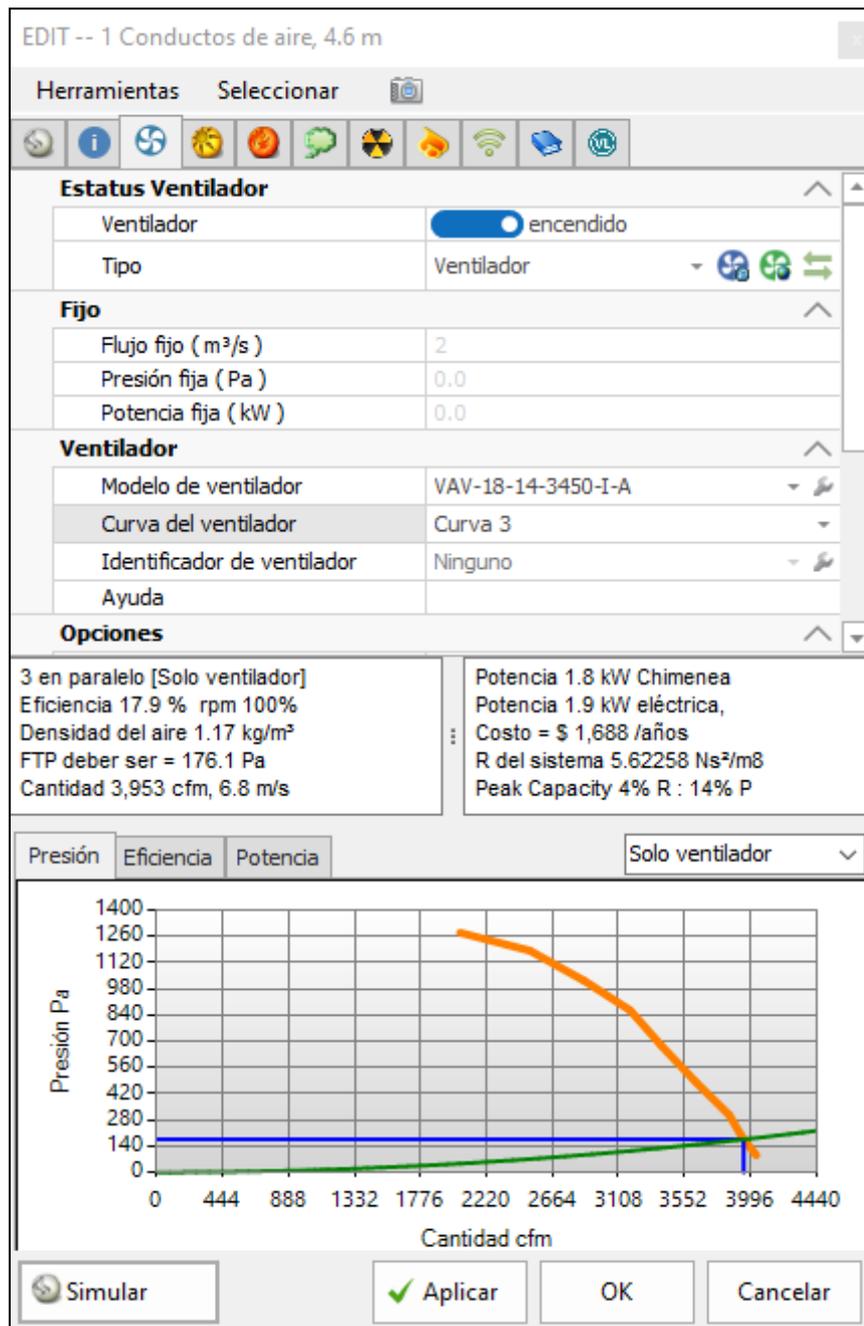


Figura 30: Curva característica 3.

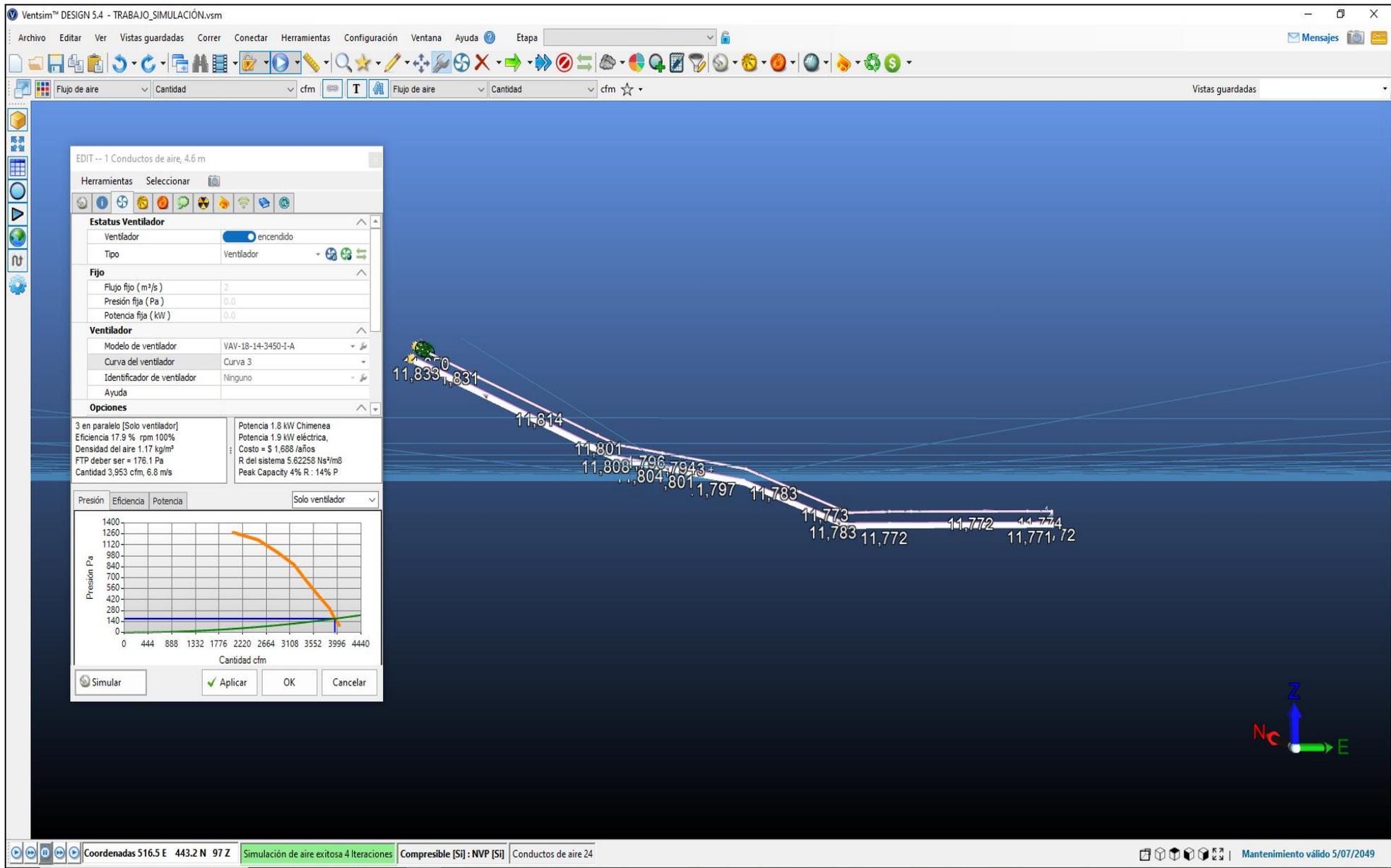


Figura 31: Sistema de ventilación simulado 03

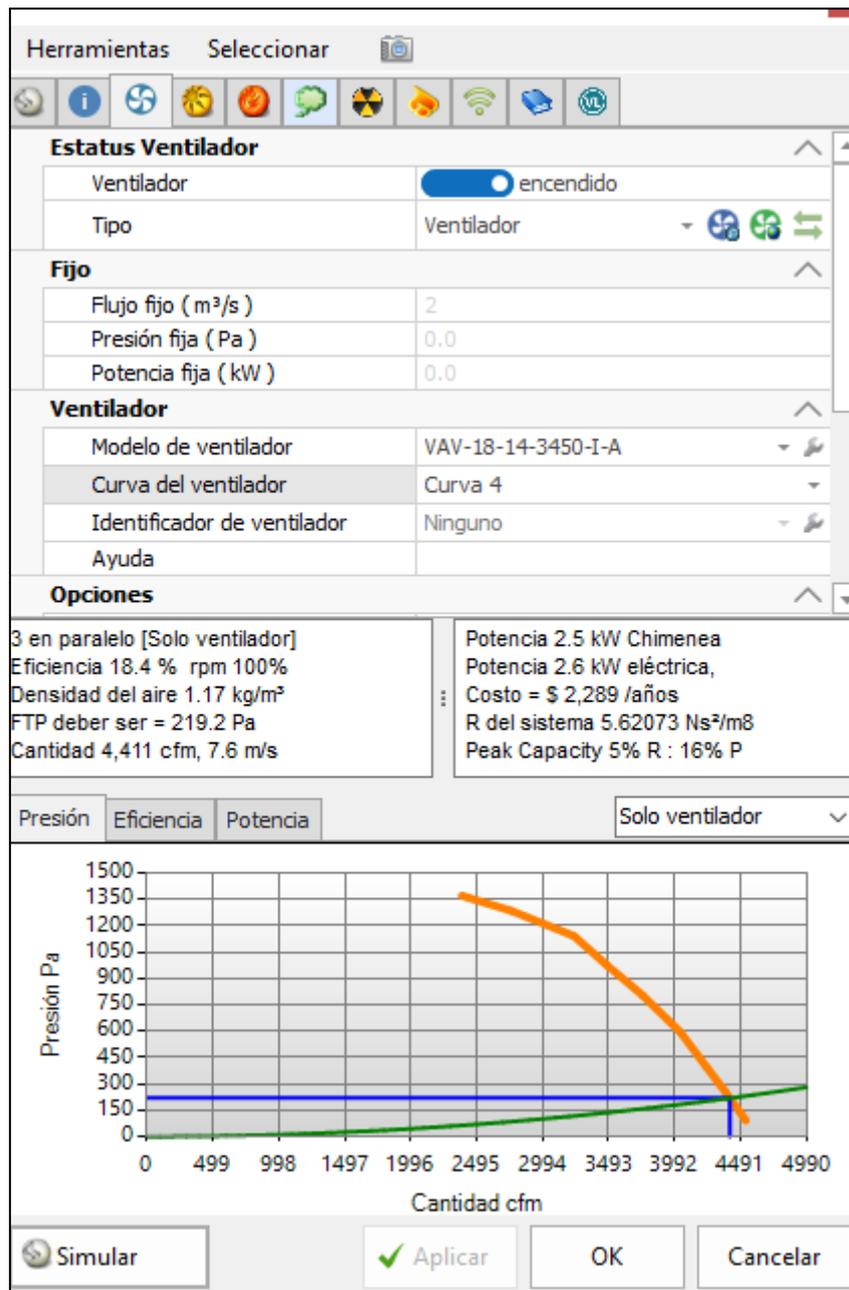


Figura 32: Curva característica 4.

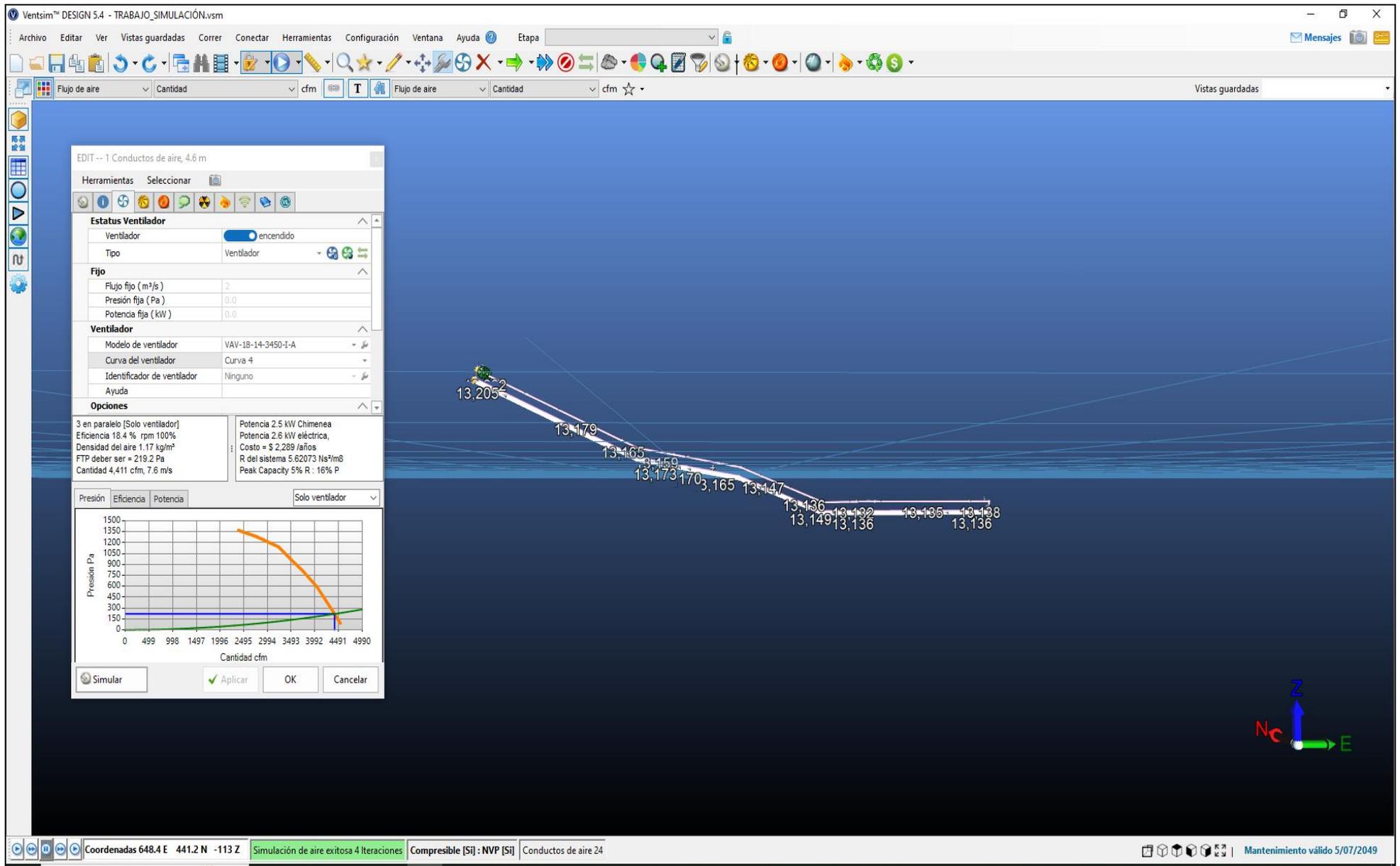


Figura 33: Sistema de ventilación simulado 04

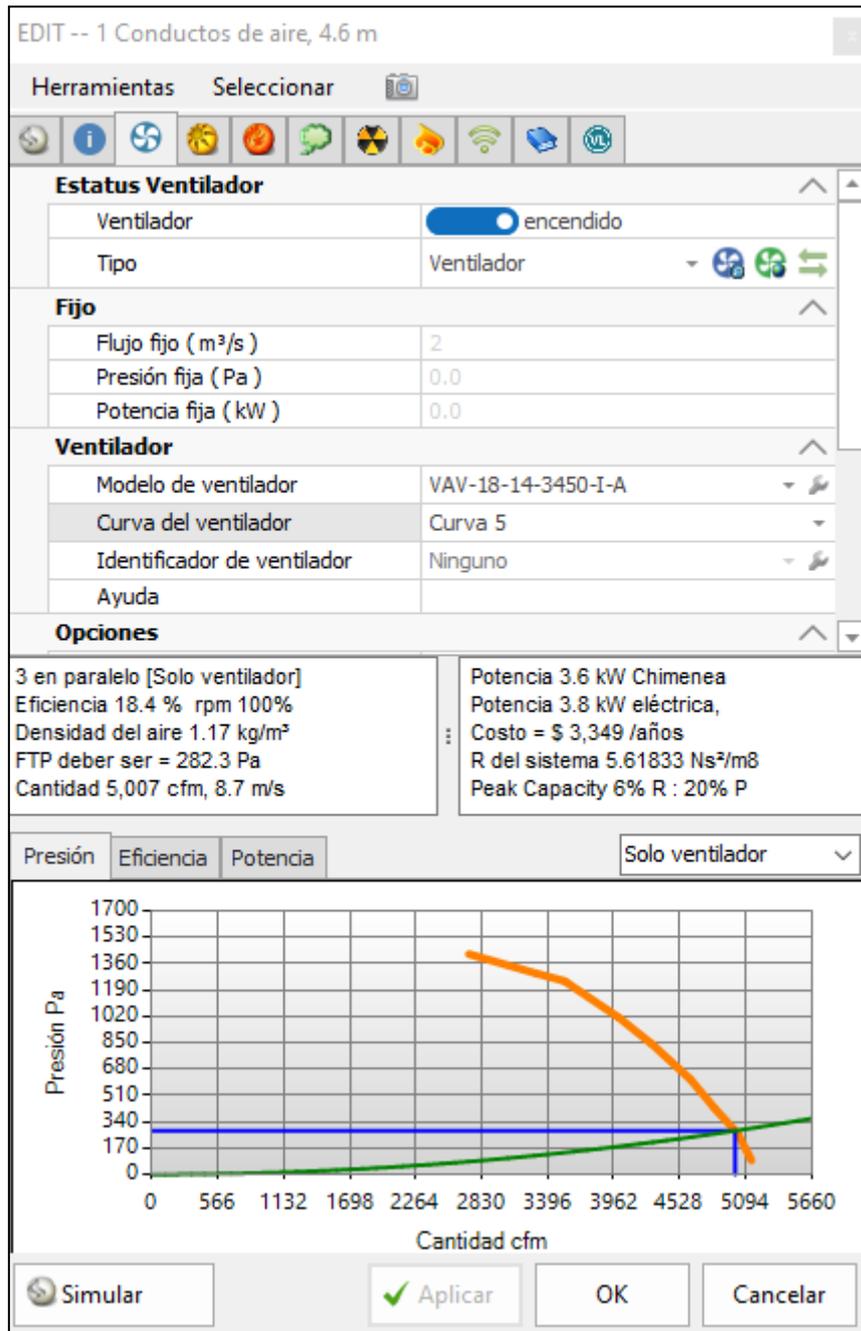


Figura 34: Curva característica 5.

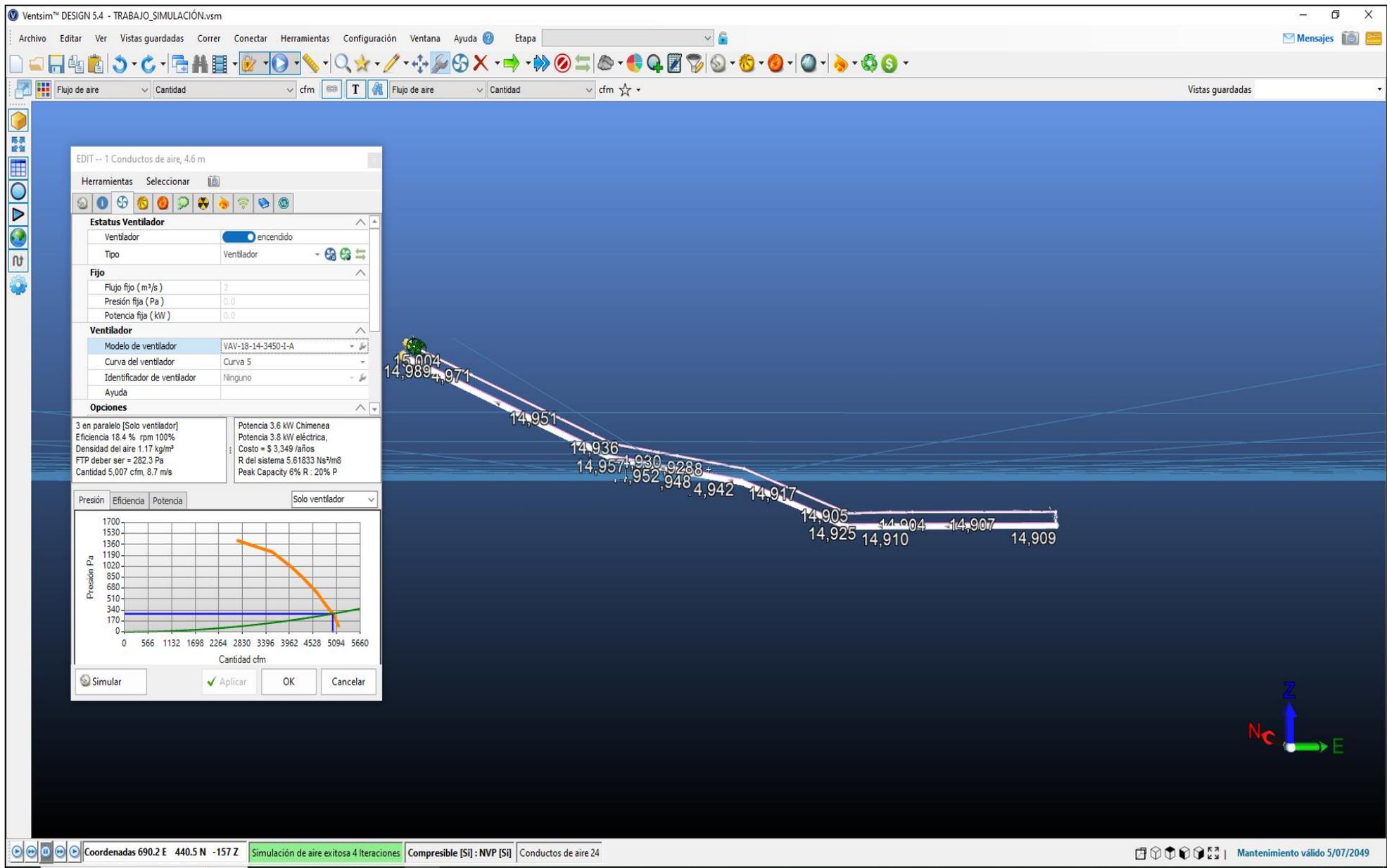


Figura 35: Sistema de ventilación simulado 05

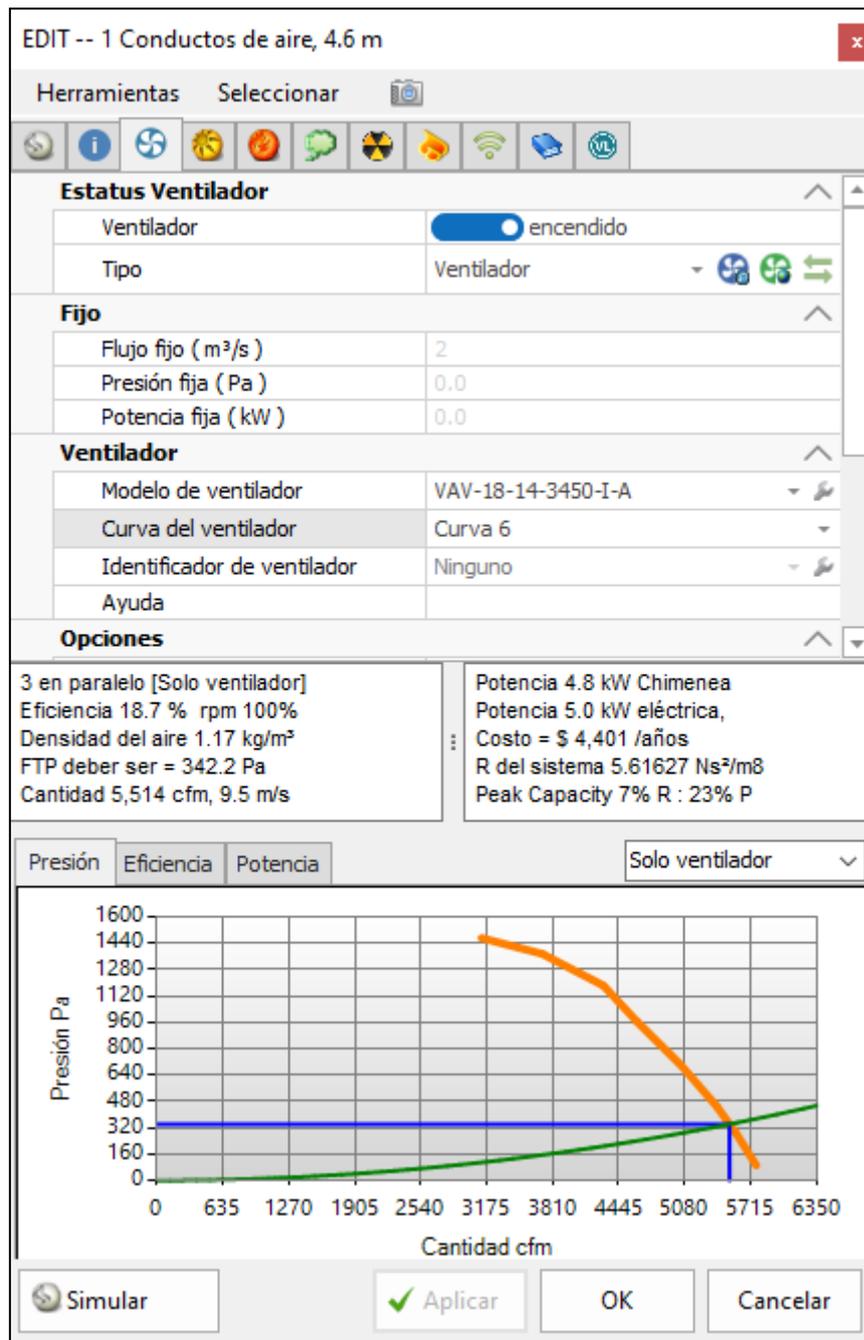


Figura 36: Curva característica 6.

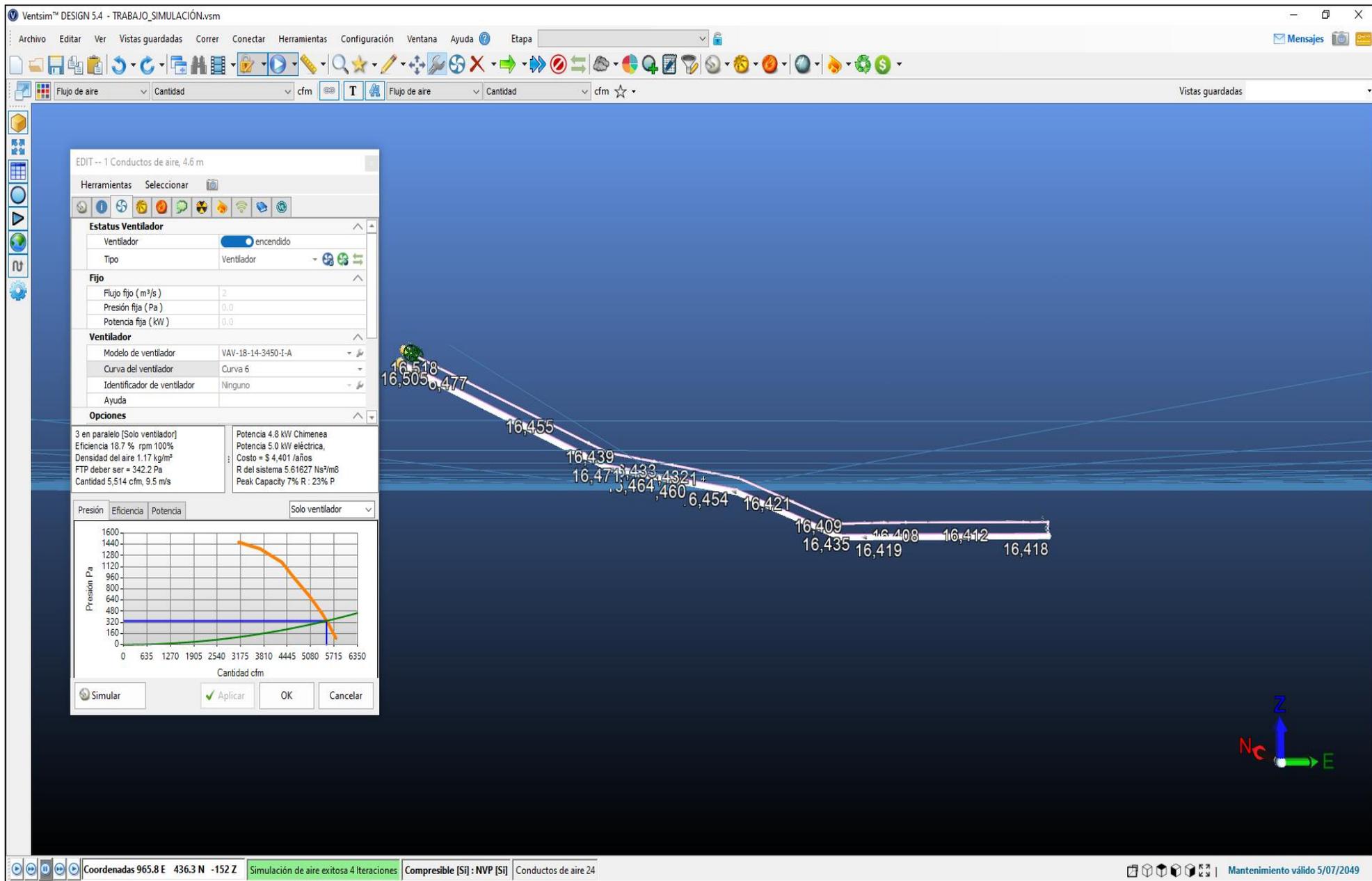


Figura 37: Sistema de ventilación simulado 06.

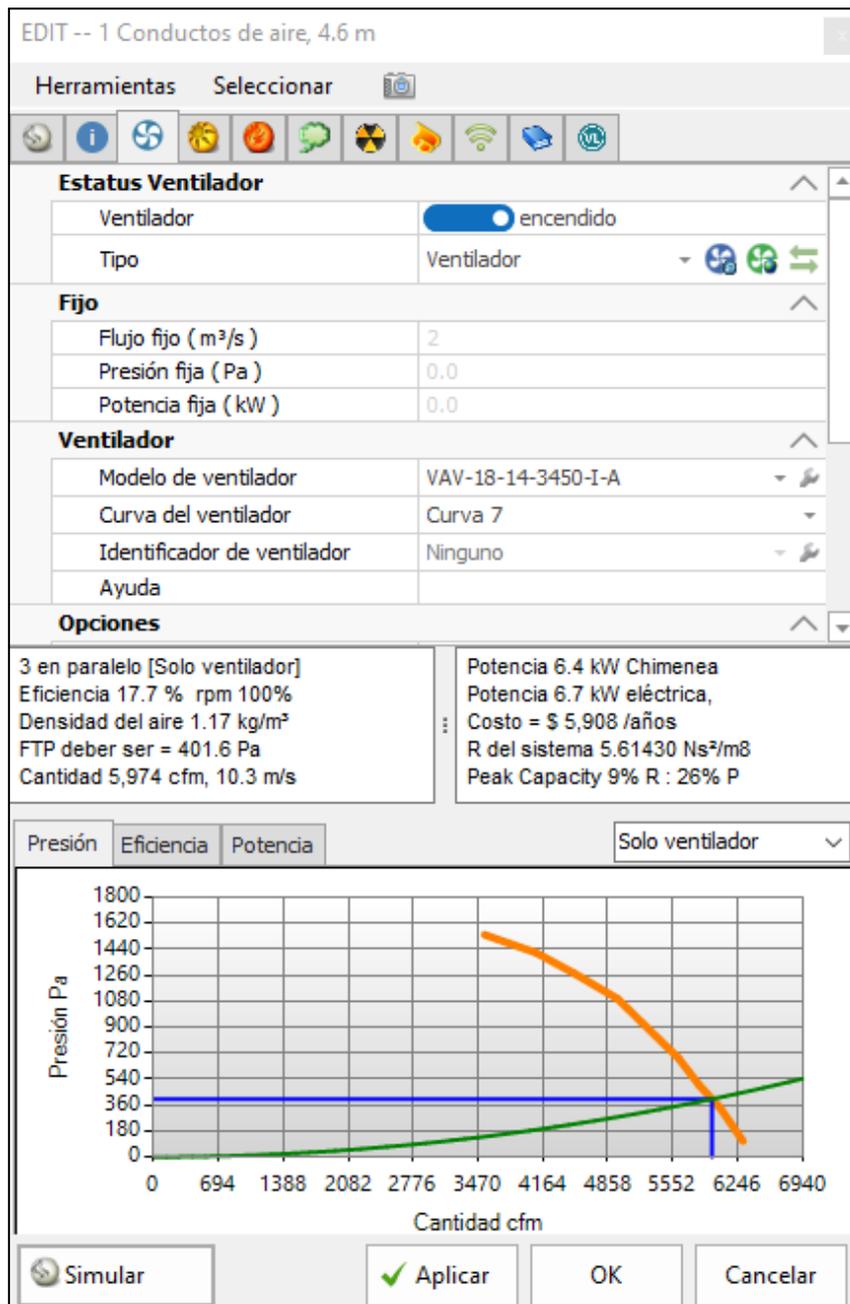


Figura 38: Curva característica 7.

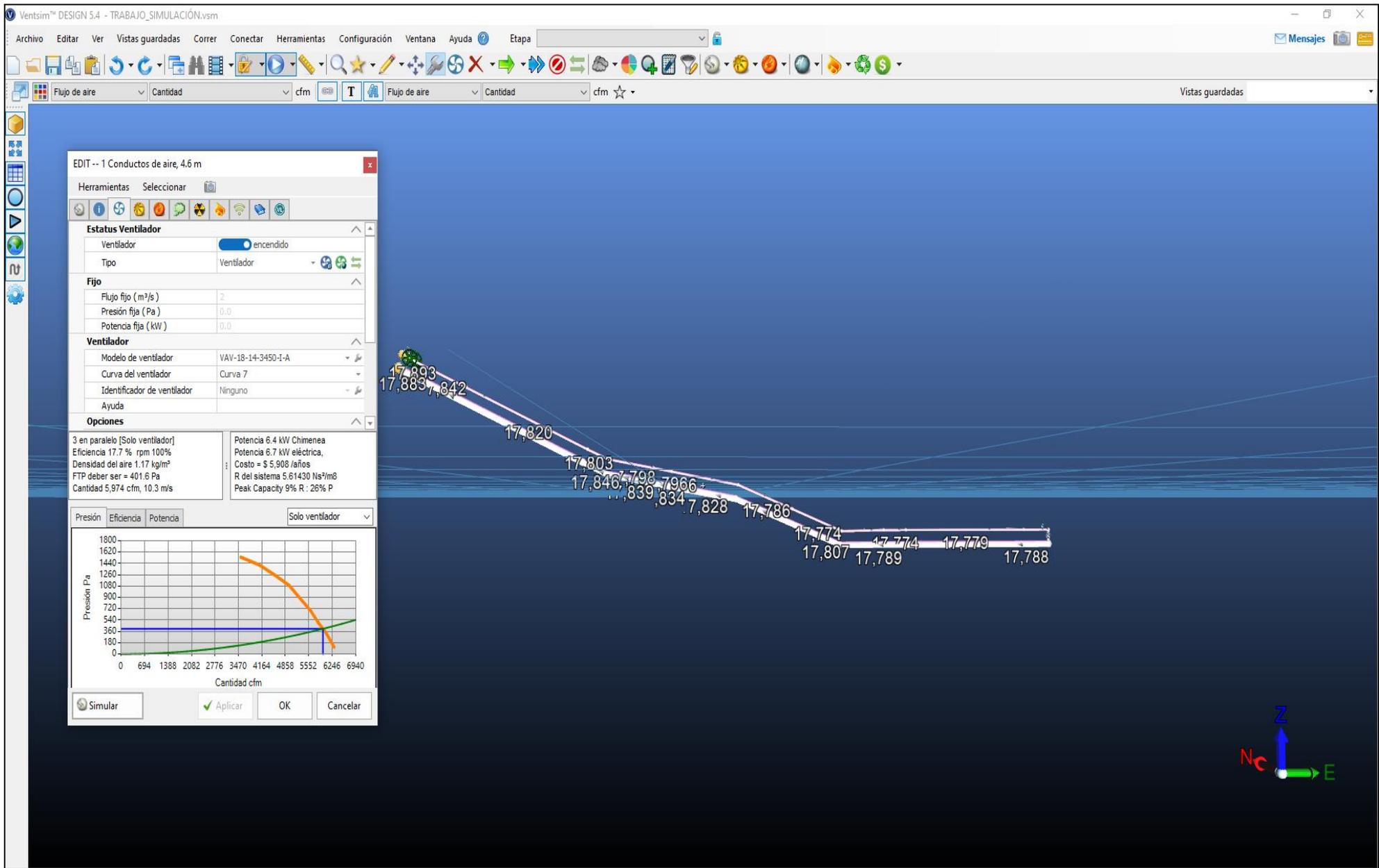


Figura 39: Sistema de ventilación simulado 07.

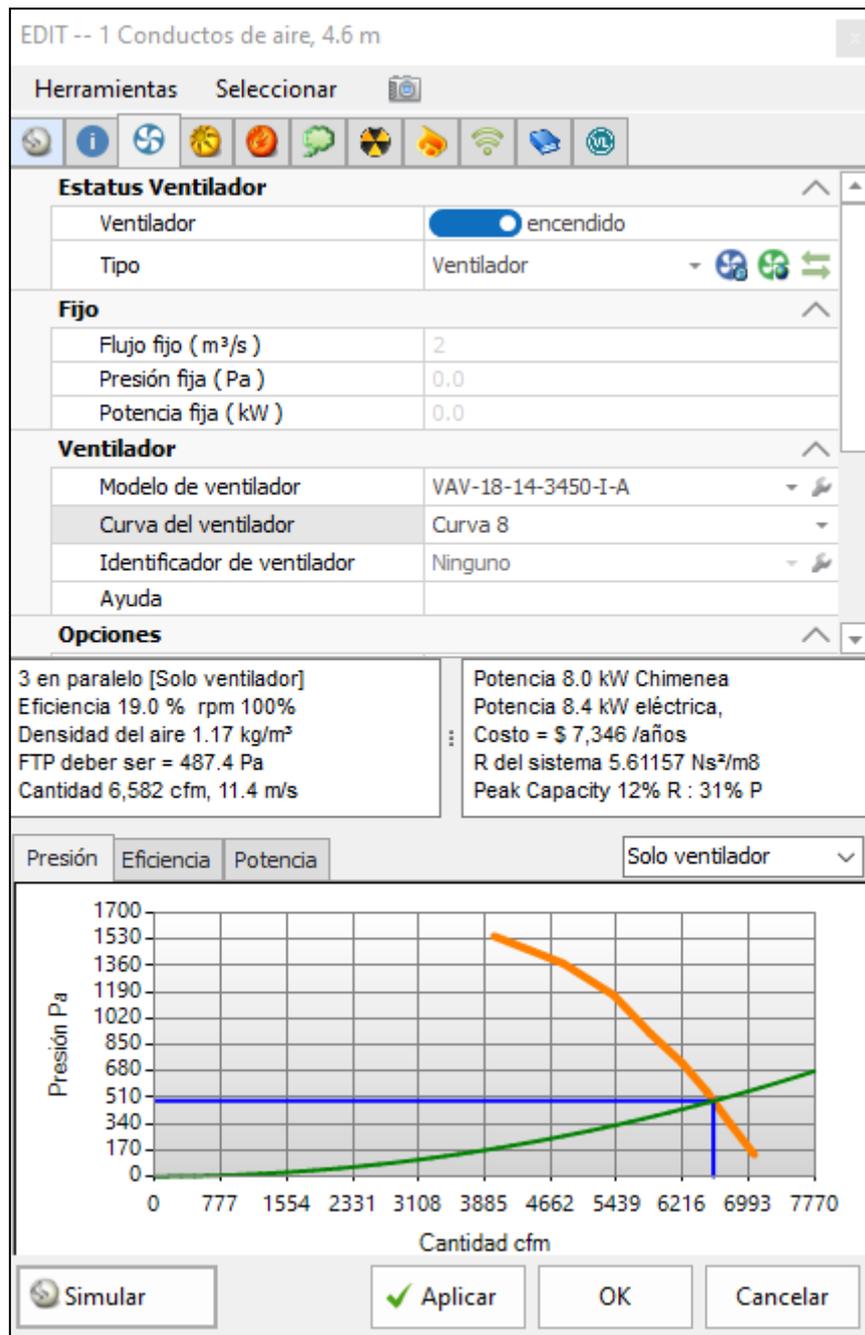


Figura 40: Curva característica 8.

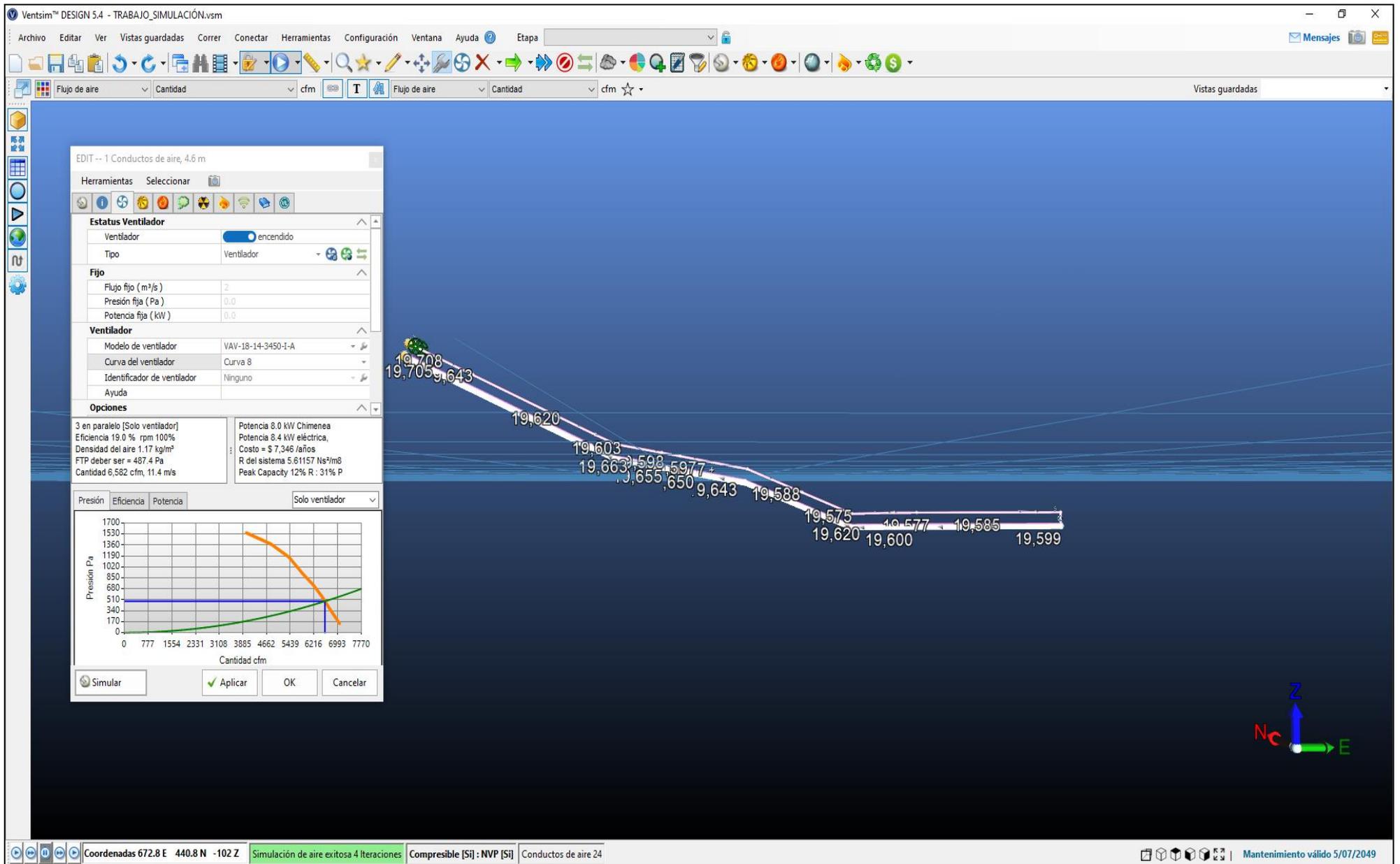


Figura 41: Sistema de ventilación simulado 08.

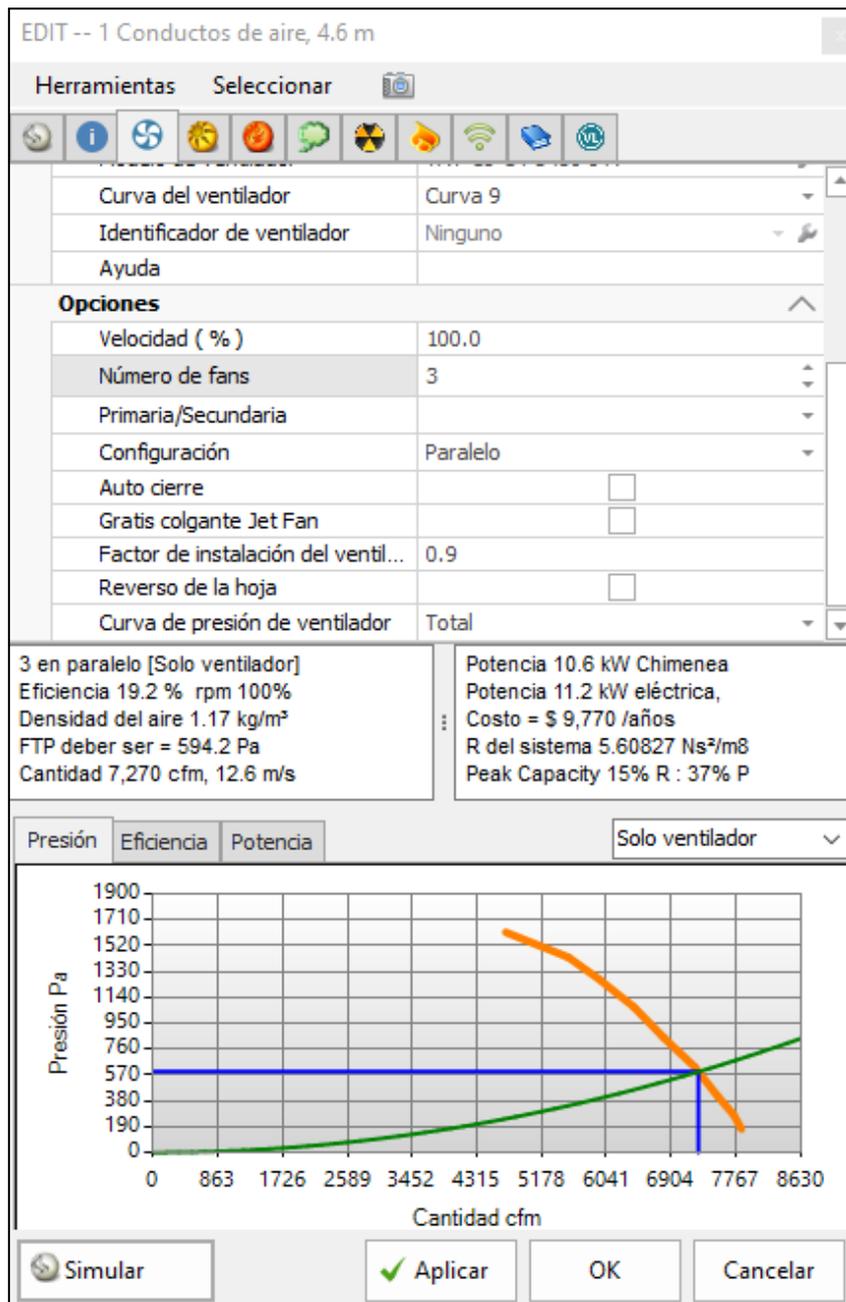


Figura 42: Curva característica 9.

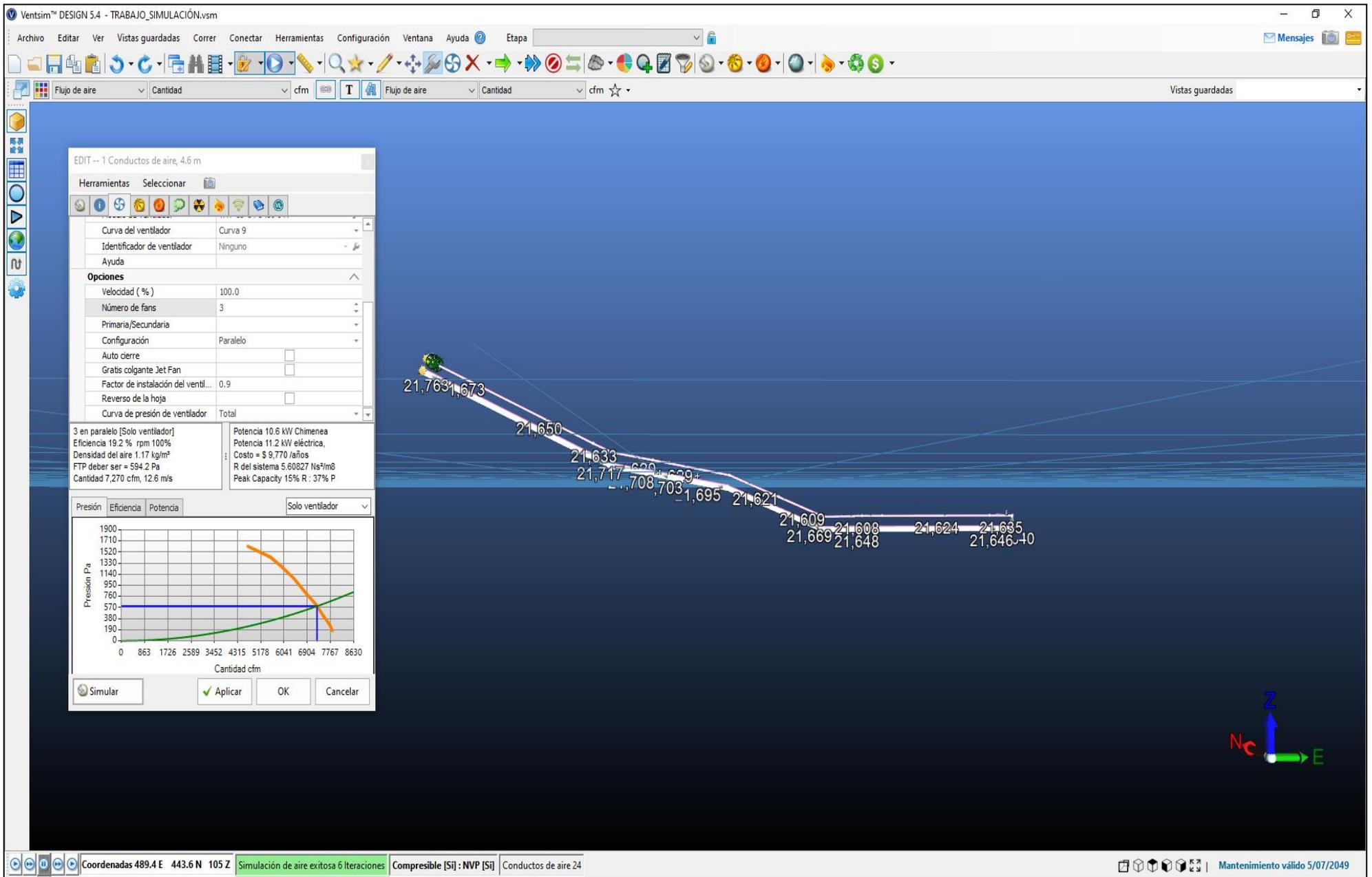


Figura 43: Sistema de ventilación simulado 09.

4.3.4 Datos Obtenidos de las Curvas del Ventilador VAV-18-14-3450-I-A

Las curvas del ventilador simulado permiten observar su comportamiento bajo diferentes condiciones de caudal y presión, permitiendo identificar su punto de operación óptimo, donde el ventilador trabaja eficientemente según la necesidad del sistema de ventilación. Asimismo, responde a cambios en la resistencia del circuito y evitar condiciones adversas como inestabilidad o sobrecarga del motor. Además, permiten evaluar la eficiencia energética y ajustar configuraciones como la velocidad o el ángulo de las palas para maximizar el rendimiento y reducir costos operativos.

Tabla 15: Caudal total por cada curva.

Número de Curva	Caudal Total simulado
Curva característica 1	8241 CFM
Curva característica 2	10081 CFM
Curva característica 3	11783 CFM
Curva característica 4	13173 CFM
Curva característica 5	14925 CFM
Curva característica 6	16435 CFM
Curva característica 7	17889 CFM
Curva característica 8	19620 CFM
Curva característica 9	21648 CFM

4.3.5 Características del Ventilador Simulado

Según Airtec (2017), cada ventilador tiene una curva característica para cada ángulo de los alabes, Con el valor del caudal medido se traza una perpendicular hasta la intersección con la curva característica de presión total, con el ángulo correspondiente de los alabes. El ventilador VAV-18-14-3450-I-A es el más utilizado en la industria minera y otras aplicaciones, sus alabes de paso variable pueden ser fácilmente regulados sin necesidad de desmontar el impulsor, su construcción robusta permite manipularlo con seguridad. Se fabrica en una o dos etapas para obtener mayores presiones (Airtec, 2017)

Tabla 16: Ventilador Simulado

VAV-18-14-3450-I-A		
Diámetro de la carcasa (pulgadas)	Diámetro de la masa del Motor (pulgadas)	Velocidad En RPM
18"	14"	3450

De acuerdo a la investigación las curvas del ventilador ofrecen un equilibrio óptimo entre bajo costo, alta eficiencia energética y el caudal de aire requerido para cumplir con las demandas del sistema. Esta selección asegura un funcionamiento eficiente, mantiene un flujo de aire adecuado para garantizar la seguridad y las condiciones óptimas en la mina “El Halcón”.

4.4 CONTRASTACION DE LA HIPÓTESIS

Según la investigación, se planteó la hipótesis; mejorar el sistema de ventilación subterránea de la veta 0 del nivel 0 incrementará la eficiencia de la mina “El Halcón”, a través de la evaluación del caudal de aire necesario. El caudal real hasta los 75 metros es de 825.092 CFM, mientras que el caudal requerido para garantizar condiciones seguras en el frente de trabajo es de 4690.979 CFM, lo que evidenciaba una deficiencia en el sistema. Tras simular las mejoras mediante el Software VENTSIM, se demostró que el caudal podría incrementarse a 8241.00 CFM, superando tanto el caudal inicial como el requerido. Este resultado confirma la hipótesis planteada, al demostrar que las modificaciones no solo cubren la demanda existente, sino que generan un margen adicional de caudal dada por las curvas del ventilador, garantizando un sistema de ventilación más eficiente y seguro.

4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian la urgente necesidad de contar con una normativa específica que regule la ventilación en la minería artesanal.

Sin embargo, cabe señalar que la realidad del proyecto minero, actualmente; cuenta con un sistema de ventilación insuficiente. Asimismo, se realizó la simulación en el Software VENTSIM, dónde se demostró la implementación de un ventilador auxiliar, logrando así la optimización del sistema actual y ayudando en evidenciar potencias y costos mínimos que son muy necesarios a la hora de tomar decisiones según los avances que se generan a lo largo de la vida de la mina.

Según Alexander Raico señala la implementación de ventilación auxiliar a través del Software VENTSIM donde se evidencia el aumento del caudal real del túnel de exploración Chaquicocha nivel 3750, coincidiendo con la ejecución de la presente investigación, logrando así el cálculo respectivo teniendo en cuenta la curva característica, lo que nos permitirá determinar el caudal requerido en interior mina.

Por lo tanto, el caudal aumentó con el ventilador simulado, superando el mínimo necesario, cuyos resultados resaltan la importancia de establecer parámetros concisos, tal como el caudal mínimo requerido, el cual está regido mediante el Decreto Supremo N°023-2017-E.M. y sus modificatorias. Lograr una regulación de este tipo permite mejorar la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores; así como también, reducir los riesgos ocupacionales y promover en el proceso de la formalización del sector que opera actualmente sin estándares y/o conocimientos técnicos básicos, dejando en evidencia la viabilidad de aplicar soluciones prácticas y accesibles como las evaluadas en este estudio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se determinó que el caudal de aire actual en la veta 0, nivel 0 de la mina El Halcón es insuficiente para cumplir con los requerimientos de ventilación necesarios para una operación segura y eficiente. El cálculo del caudal de aire requerido permitió establecer las necesidades reales de ventilación en función del número de trabajadores, uso de madera, temperatura y fugas, evidenciando una brecha significativa respecto al caudal actual.

La simulación realizada en el software VENTSIM demostró que la propuesta de mejorar del sistema de ventilación a través de un ventilador auxiliar en específico, la cual nos indica que dicho ventilador auxiliar en paralelo tipo VAV-18-14-3450-I-A logra incrementar el caudal de aire, así como también generando un margen adicional asegurando la ventilación adecuada frente a los avances y/o cambios en las condiciones operativas.

Los resultados obtenidos evidencian que las medidas propuestas son técnicamente viables y representan soluciones prácticas para mejorar del sistema de ventilación de la mina “El Halcón”.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar los ventiladores auxiliares propuestos en las zonas críticas de la veta 0, nivel 0, siguiendo las especificaciones obtenidas en la simulación con el software Ventsim, para asegurar el caudal de aire requerido.

Se recomienda a la empresa minera implementar sistemas de monitoreo que permitan verificar el caudal real y las concentraciones de gases y partículas en las zonas de trabajo, asegurando que los valores se mantengan dentro de los rangos seguros.

En el área de supervisión se le recomienda evaluar periódicamente el sistema de ventilación realizando simulaciones periódicas con herramientas como Software VENTSIM para identificar necesidades futuras y ajustar el diseño del sistema de ventilación conforme se avance en la operación minera.

Considerar la actualización y evaluación continua del sistema de ventilación ante cambios en el avance de la mina, ya que se está asegurando que las modificaciones operativas no afecten la calidad de la ventilación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Aranguaren, R. C. 2021. Evaluación Del Sistema De Ventilación De La Mina El Roble. Colombia.
- Airtec. 2017. Estudio de ventilación del proyecto Chaquicocha North Exploration Drift. Informe Técnico. Lima, Perú. 32 p.
- Calizaya, F. 2022. Instalación de ventiladores y controles de ventilación en minas metálicas. USA: Revista de Medio Ambiente y Minería.
- Carlotto Caillaux, V. S., Cárdenas Roque, J. D., Báez, D., & Rodríguez Mejía, R. 2008. Alto estructural Totos-Paras Ayacucho. Límite paleogeográfico en la evolución Mesozoica de las cuencas Arequipa y Pucará.
- Chacón, J. A. 2020. Diseño del sistema de ventilación de la mina subterránea de Oro “Sosa Méndez”, Municipio El Callao, Edo Bolívar–Venezuela. Callao, Edo bolívar.
- Córdova, C., & Molina Escobar, J. 2011. Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. Boletín de Ciencias de la Tierra.
- Escobar Gonzales, B. A., & Rodas Espiche, G. C. 2020. Evaluación del sistema de ventilación en la minera artesanal subterránea de Algamarca, Algamarca. Cajabamba.
- Finkelman, R. B. 2003. Environmental impacts of mining activities: emphasis on mitigation and remedial measures. Springer Science & Business Media.
- Harrison, R. M. 2002. Mining and its environmental impact. The Royal Society of Chemistry.
- Hartman, H.L., Mutmansky, J.K., Ramani, R.V., & Wang, Y.J. 2016. Introductory Mining Engineering 2nd edition.

- Herbet, J. H. 2019. Introducción a la Minería . Madrid.
- Jan M. Mutmansky. 1996. Ventilation and Air Conditioning in Underground Mines.
- Kingery, D. 1960. Introduction to mine ventilating principles and practices. Whashington. United States. 53 p.
- Larry J. K. Mutmansky, H. L. 2002. Introductory Mining Engineering.
- Luque, V. 1998. Manual de ventilación de minas. España, Asociación de Investigación Tecnológica de Equipos Mineros ATEMIN.
- Mallqui, T. 1980. Proyecto de Optimización del Sistema de Ventilación.
- Mutmansky, J. M. 2000. Ventilation and Air Conditioning in Underground Mines.
- Novistky, A. 1962. Ventilación de minas. Buenos Aires, Argentina. 552 p.
- OSINERGMIN. 1997. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- Oyarzun, H. 2015. Mineralogía y Residuos Mineros.
- Ramani, R. V. 2004. Engineering Considerations of Underground Ventilation.
- Ramirez. 2005. Ventilación de minas. Chaparra - Perú: módulo de capacitación.
- Valle, R. M. 2021. Optimización del sistema de ventilación de la mina Charito, compañía minera Poderosa SA. Trujillo.
- Yoman, C. L. 2017. Estudio de ventilacion e implementacion de mejoras en el circuito de ventilacion de Minera Sotrami SA–UEA Santa Filomena–aplicando el Software VENTSIM. Arequipa.
- Zitrón. 2010. Ventilación de minas. Gijón, España. 179 p.

ANEXOS

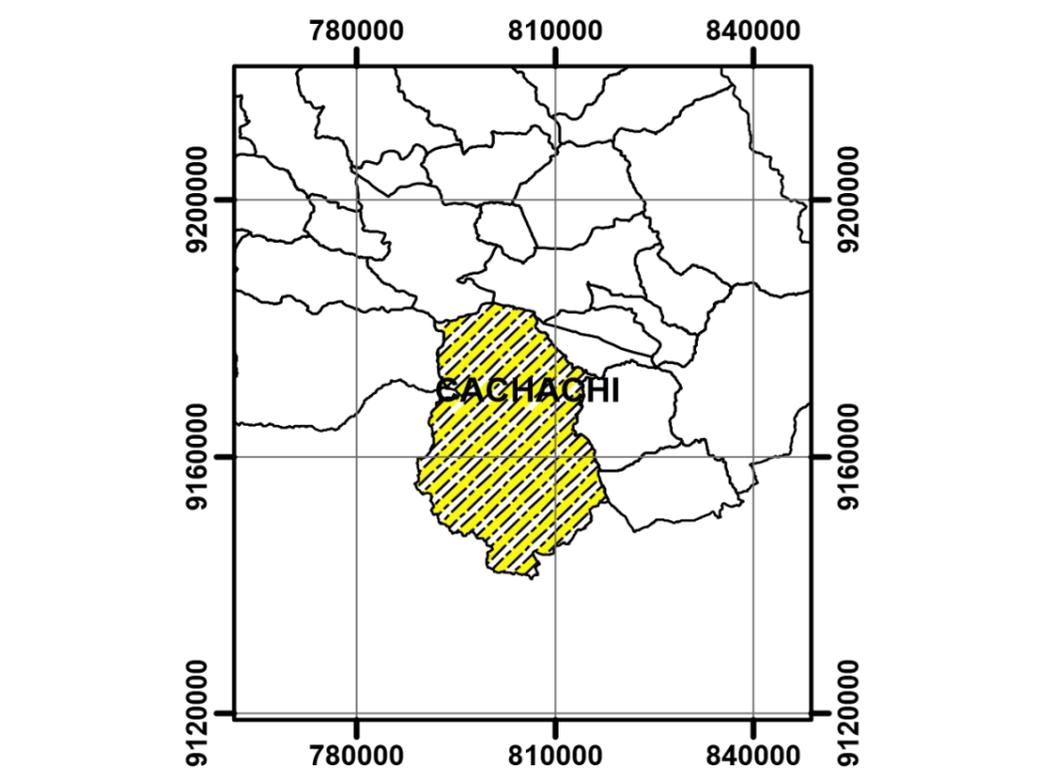
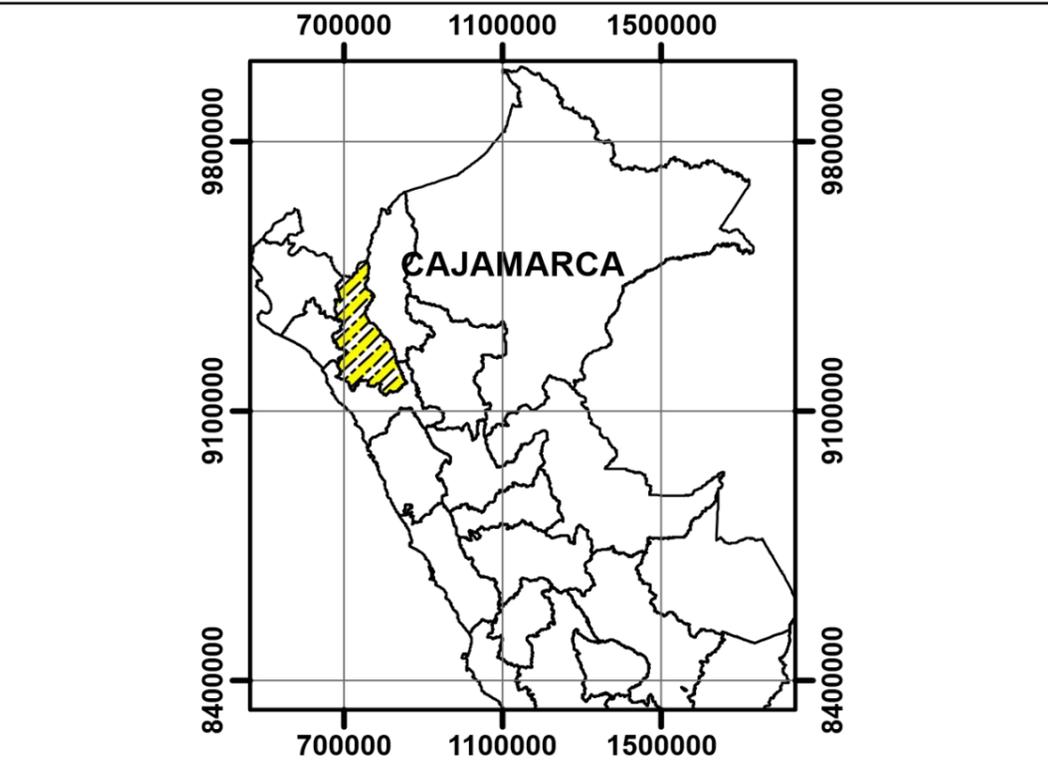
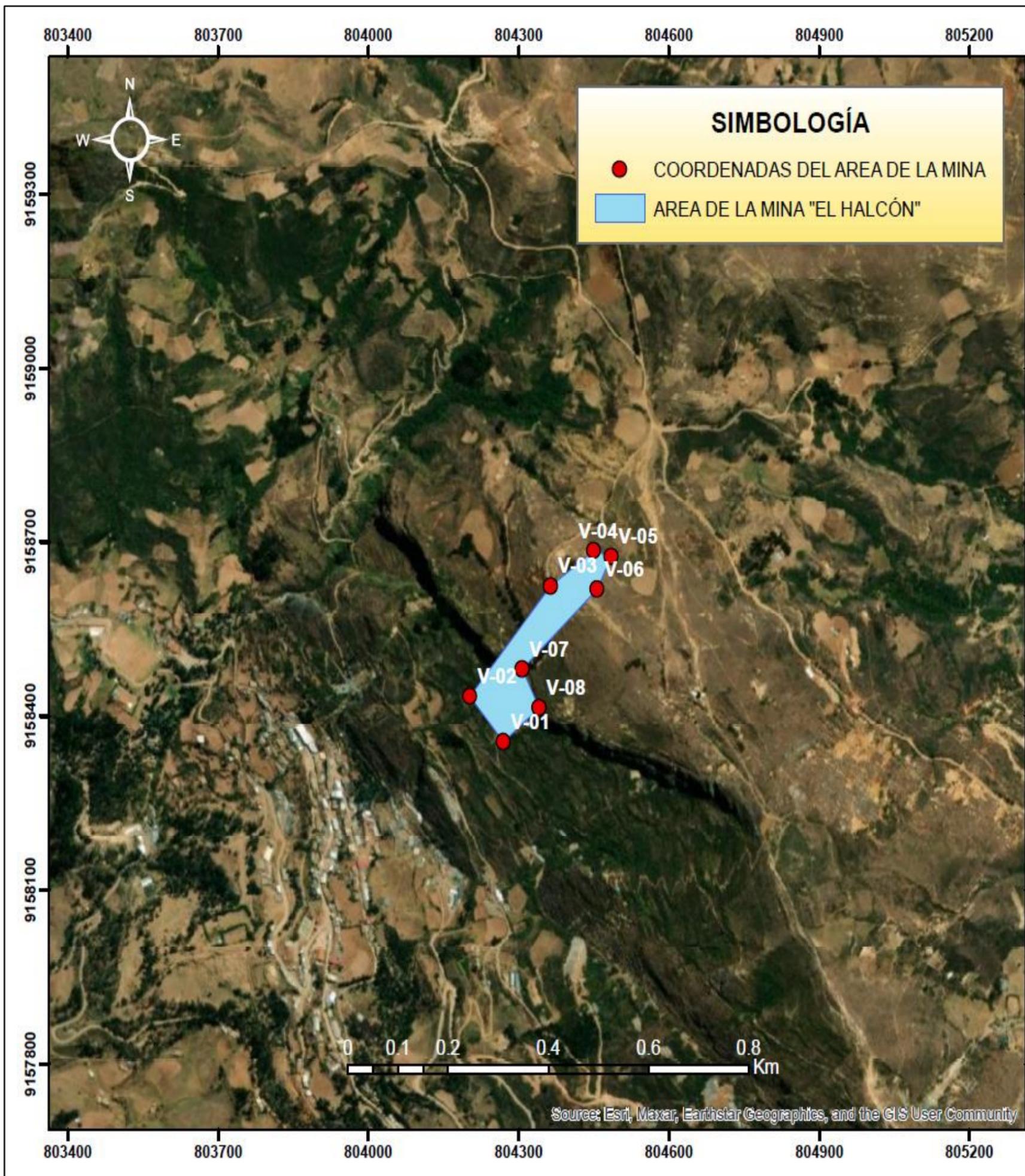
A. Planos generales

Anexo 1. Plano de Ubicación de la mina “El Halcón”.

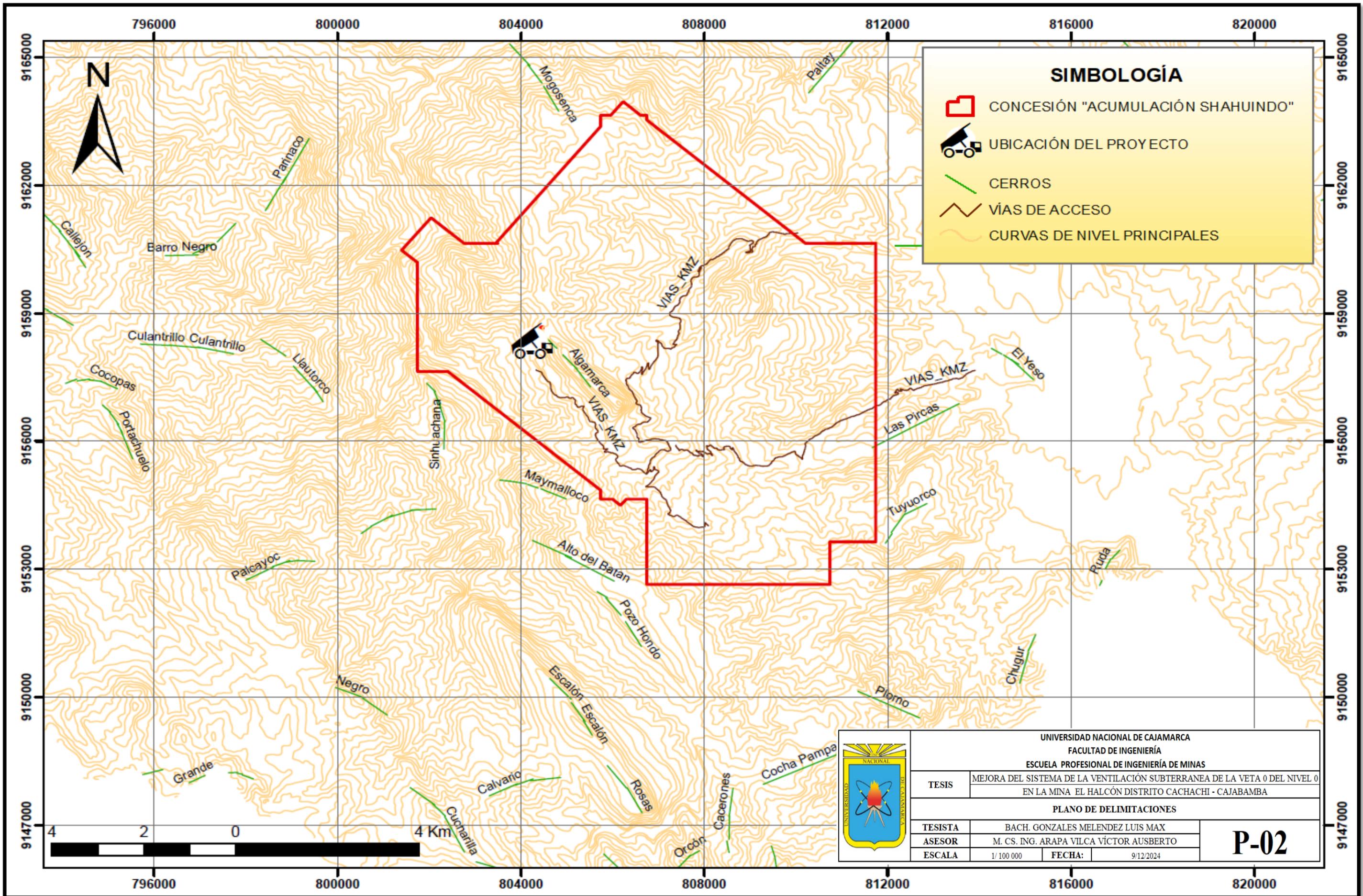
Anexo 2. Plano de Delimitaciones de la concesión

Anexo 3. Plano del nivel 0 de la mina "El Halcón"

Anexo 4. Plano Geológico de la mina “El Halcón”.



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA		<p>P-01</p>
	FACULTAD DE INGENIERÍA		
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS			
TESIS	MEJORA DEL SISTEMA DE LA VENTILACIÓN SUBTERRANEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI - CAJABAMBA		
PLANO DE UBICACIÓN			
TESISTA	BACH. GONZALES MELENDEZ LUIS MAX		
ASESOR	M. CS. ING. ARAPA VILCA VÍCTOR AUSBERTO		
ESCALA	1/50 000	FECHA:	9/12/2024



9158720N

9158720N

SIMBOLOGÍA

 Bocamina
 Labores
 Nivel 0

9158680N

804235E

804285E

8047335E

804385E

9158630N

9158630N

9158580N

9158580N

9158530N

9158530N

9158480N

9158480N

9158480N

804235E

CUADRO DE COORDENADAS UTM 84 WGS

PUNTO	NORTE	ESTE	COTA (piso)	OBSERV.
1	9158627.59	804403.925	3299.132	cruc2
5	9158601.19	804425.037	3300.366	CRUCA4
6	9158603.36	804422.305	3299.71	PARED
7	9158605.68	804423.691	3299.744	PARED
8	9158605.56	804421.09	3300.231	PARED
10	9158654.72	804460.953	3300.633	CRUC
11	9158668.73	804489.969	3300.344	CRUCA4
12	9158660.73	804509.113	3301	TOPE
15	9158644.71	804475.824	3277.135	TAJ
20	9158610.35	804441.541	3274.579	WINCH
200	9158628.39	804445.923	3299.574	COMP



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: MEJORA DEL SISTEMA DE LA VENTILACIÓN SUBTERRANEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI - CAJABAMBA

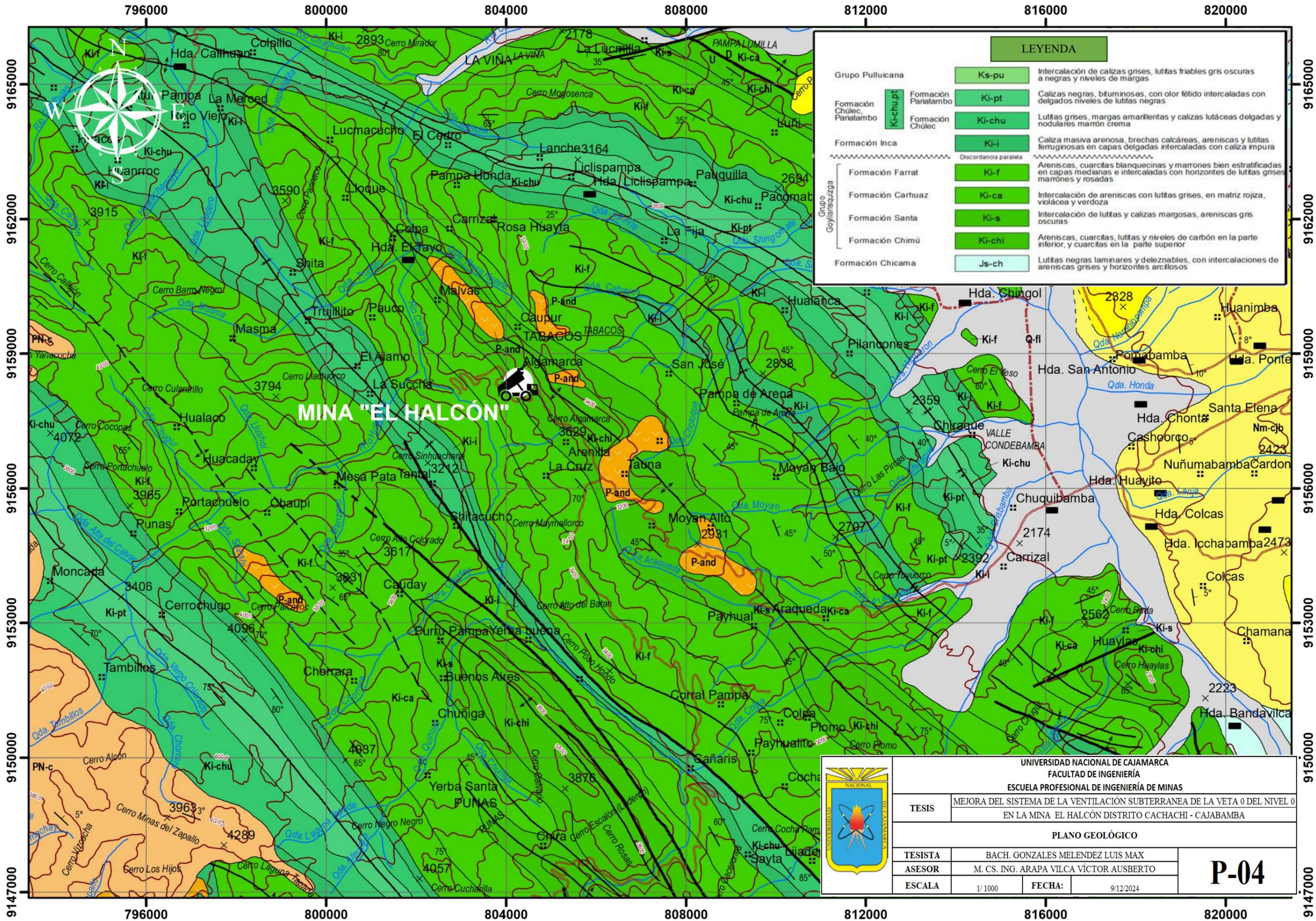
PLANO DEL NIVEL 0 DE LA MINA EL HALCÓN

TESISTA: BACH. GONZALES MELENDEZ LUIS MAX
 ASESOR: M. CS. ING. ARAPA VILCA VÍCTOR AUSBERTO
 ESCALA: 1/1000 FECHA: 9/12/2024

P-03

ALERIA EL HALCON (levantado con estación total)

CRUCERO SE
 GALERIA
 LABORES DE TAJEO
 CRUCERO NE
 CRUCERO NE
 Ubicación Pique (Wiyche)
 A



LEYENDA			
Grupo Pullucana	Ks-pu	Intercalación de calizas grises, lutitas friables gris oscuras a negras y niveles de margas	
Formación Chúlec, Pariatambo	Ki-pt	Calizas negras, bituminosas, con olor fétido intercaladas con delgados niveles de lutitas negras	
	Ki-chu	Lutitas grises, margas amarillentas y calizas lutáceas delgadas y nodulares marrón crema	
Formación Inca	Ki-i	Caliza masiva arenosa, brechas calcáreas, areniscas y lutitas ferruginosas en capas delgadas intercaladas con caliza impura	
Grupo Goyllansuzqga	Discordancia paralela	~	
	Formación Farrat	Ki-f	Areniscas, cuarcitas blanquecinas y marrones bien estratificadas en capas medianas e intercaladas con horizontes de lutitas grises marrones y rosadas
	Formación Carhuaz	Ki-ca	Intercalación de areniscas con lutitas grises, en matriz rojiza, violácea y verdeza
	Formación Santa	Ki-s	Intercalación de lutitas y calizas margosas, areniscas gris oscuras
Formación Chimú	Ki-chi	Areniscas, cuarcitas, lutitas y niveles de carbón en la parte inferior, y cuarcitas en la parte superior	
Formación Chicama	Js-ch	Lutitas negras laminares y deleznales, con intercalaciones de areniscas grises y horizontes arcillosos	

MINA "EL HALCÓN"



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA			
FACULTAD DE INGENIERÍA			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS			
TESIS	MEJORA DEL SISTEMA DE LA VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA DE LA VETA 0 DEL NIVEL 0 EN LA MINA EL HALCÓN DISTRITO CACHACHI - CAJABAMBA		
PLANO GEOLÓGICO			
TESISTA	BACH. GONZALES MELENDEZ LUIS MAX		
ASESOR	M. CS. ING. ARAPA VILCA VÍCTOR AUSBERTO		
ESCALA	1/1000	FECHA:	9/12/2024
			P-04