

UNIVERSIDAD NACIONAL CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas



TESIS PROFESIONAL

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL
TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA NIVEL 3750 - MINERA
YANACOCCHA, 2018**

Para Optar El Título Profesional De:
INGENIERO DE MINAS

Presentado Por:
Bach. Alexander Raico Tasilla

Asesor:
Ing. Roberto Severino Gonzales Yana

Cajamarca - Perú
2019

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas sus bendiciones y por permitirme llegar hasta este punto de mi vida.

Mi agradecimiento a mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca y a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.

De la misma manera mi agradecimiento a mi familia, en especial a mis queridos padres por todo su esfuerzo y dedicación hacia mi persona durante todos estos años.

Y un agradecimiento especial a Minera Yanacocha por haberme permitido realizar esta investigación, en especial a todo el equipo del Proyecto Chaquicocha Underground.

Alexander Raico

DEDICATORIA

A Dios, quien es mi guía en todo momento;
quien me cuida y me protege siempre.

A mis queridos padres Evaristo y Consuelo,
quienes son mi motivación para seguir
adelante cada día, a ellos mi gratitud y todo
mi amor.

A mi hermano José Manuel, por todo su
cariño, amor y apoyo.

Alexander Raico

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE FOTOS.....	x
ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	3
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	3
2.2. BASES TEÓRICAS.....	4
2.2.1. Atmosfera de mina.....	4
2.2.2. Métodos de ventilación de minas.....	4
2.2.3. Sistemas de ventilación.....	6
2.2.4. Ventiladores, tipos y diferencias.....	9
2.2.5. Normas legales que sustentan el estudio.....	13
2.2.6. Requerimiento de aire.....	15
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	19
CAPÍTULO III.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1. UBICACIÓN.....	21

	Pág.
3.2. ACCESIBILIDAD	21
3.3. CLIMA	23
3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.4.1. Definición de variables	24
3.4.2. Tipo y método de la investigación	24
3.4.3. Población de estudio	24
3.4.4. Muestra	24
3.4.5. Unidad de análisis	24
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	25
3.5.1. Técnicas	25
3.5.3. Materiales y equipos	25
3.5.4. Softwares	26
3.6. PROCEDIMIENTO	26
3.6.1. Evaluación del sistema de ventilación inicial	26
3.6.2. Optimización del sistema de ventilación	27
3.7. GEOLOGÍA	28
3.8. GENERALIDADES DEL PROYECTO	30
3.8.1. Túnel de Exploración Chaquicocha	30
3.8.2. Componentes	30
3.8.3. Proceso operativo en los frentes de desarrollo	34
3.9. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN INICIAL	37
3.9.1. Descripción del sistema de ventilación	37
3.9.2. Requerimientos de caudal aire	37
3.9.3. Medición de caudal de aire	40
3.9.4. Análisis de las mediciones de caudal de aire	44
3.10. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	45
3.10.1. Marco de referencia	45
3.10.2. Consideraciones del diseño	45
3.10.3. Dimensionamiento de los ventiladores	48
3.10.4. Características de los ventiladores utilizando Ventsim	52
3.10.5. Especificaciones técnicas de los ventiladores	56
3.10.6. Especificaciones técnicas de los conductos de ventilación	59

	Pág.
3.10.7. Simulación del sistema de ventilación en Ventsim	60
3.11. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	62
3.11.1. Ventilador principal 01 (VP 01)	62
3.11.2. Ventilador auxiliar 01 (VA 01)	64
3.11.3. Ventilador auxiliar 02 (VA 02)	64
3.11.4. Ventilador auxiliar 03 (VA 03)	65
3.12. MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	66
3.12.1. Medición de caudal de aire.....	67
3.12.2. Análisis de las mediciones de caudal de aire	70
CAPÍTULO IV	71
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	71
4.2. ANÁLISIS DEL CAUDAL DE AIRE	71
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	78
CAPÍTULO V.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5.1. CONCLUSIONES.....	79
5.2. RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Gases presentes en actividades mineras.....	14
Tabla 2. Límites de exposición ocupacional para agentes químicos	15
Tabla 3. Factor de producción de acuerdo al consumo de madera	17
Tabla 4. Velocidad mínima.....	18
Tabla 5. Variables de la investigación.....	24
Tabla 6. Potencia efectiva de equipos petroleros utilizados inicialmente.	39
Tabla 7. Requerimiento total de aire para el sistema de ventilación inicial.	39
Tabla 8. Medición 01 del sistema de ventilación inicial.	42
Tabla 9. Medición 02 del sistema de ventilación inicial.	43
Tabla 10. Caudal de aire promedio del sistema de ventilación inicial.	44
Tabla 11. Cobertura de aire del sistema de ventilación inicial.	44
Tabla 12. Potencia efectiva de equipos petroleros (ventilador principal).	49
Tabla 13. Requerimiento de aire para el ventilador principal.....	50
Tabla 14. Potencia efectiva de equipos petroleros (Ventilador auxiliar).	51
Tabla 15. Requerimiento total de aire para los ventiladores auxiliares.	52
Tabla 16. Características y ubicación de los ventiladores.....	52
Tabla 17. Características del ventilador principal utilizando Ventsim.	54
Tabla 18. Características de los ventiladores auxiliares utilizando Ventsim.....	55
Tabla 19. Características de los ventiladores de acuerdo al modelo en Ventsim	56
Tabla 20. Especificaciones técnicas de los ventiladores.	56
Tabla 21. Características de los ductos metálicos.....	59
Tabla 22. Ventiladores del sistema aspirante con apoyo impelente.....	62
Tabla 23. Medición 01 del sistema de ventilación implementado.....	68
Tabla 24. Medición 02 del sistema de ventilación implementado.....	69
Tabla 25. Caudal de aire promedio del sistema de ventilación implementado.....	70
Tabla 26. Cobertura de aire del sistema de ventilación implementado.....	70
Tabla 27. Evaluación de los sistemas de ventilación.	71
Tabla 28. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 01.....	72
Tabla 29. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 02.....	72
Tabla 30. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 03.....	73
Tabla 31. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 04.....	74

	Pág.
Tabla 32. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 05.....	75
Tabla 33. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 06.....	75
Tabla 34. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 07.....	76
Tabla 35. Variación de caudales en la estación de ventilación 08.....	77
Tabla 36. Resumen de variaciones de caudal de aire.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de ventilación natural. (SERNAGEOMIN, 2008)	5
Figura 2. Sistema de ventilación impelente. (López, 2011).	6
Figura 3. Zonas del sistema de ventilación impelente. (López, 2011).	7
Figura 4. Sistema de ventilación aspirante. (López, 2011).	8
Figura 5. Sistema de ventilación mixta. (López, 2011).	8
Figura 6. Sistema aspirante con apoyo impelente. (López, 2011).	9
Figura 7. Partes de un ventilador centrífugo. (Luque, 1988).	10
Figura 8. Ventilador centrífugo. (Zitrón, 2010).	11
Figura 9. Ventilador axial. (Zitrón, 2010).	12
Figura 10. Ubicación típica de los gases de acuerdo a su densidad (Airtec, 2018).	15
Figura 11. Ubicación de Minera Yanacocha.	22
Figura 12. Ubicación del Túnel de Exploración Chaquicocha en AutoCAD.	23
Figura 13. Columna estratigráfica del distrito Yanacocha. (Vilela, 2014)	29
Figura 14. Isométrico del Túnel de Exploración Chaquicocha en Ventsim.	30
Figura 15. Isométrico del falso túnel en AutoCAD.	32
Figura 16. Proceso operativo del Túnel de Exploración Chaquicocha.	36
Figura 17. Método del barrido. (Zitrón, 2010).	40
Figura 18. Estaciones de ventilación del sistema de ventilación inicial en AutoCAD. ..	41
Figura 19. Propuesta de optimización del sistema de ventilación en AutoCAD.	47
Figura 20. Simulación del sistema de ventilación.	53
Figura 21. Características del ventilador principal utilizando Ventsim.	54
Figura 22. Características de los ventiladores auxiliares utilizando Ventsim.	55
Figura 23. Curva característica del ventilador principal. (Airtec, 2017).	57
Figura 24. Curva característica de los ventiladores auxiliares. (Airtec, 2017).	58
Figura 25. Dimensión del ducto metálico típico. (Airtec, 2017).	59
Figura 26. Modificación de la simulación del sistema de ventilación.	61
Figura 27. Esquema de instalación de ductos metálicos en AutoCAD.	63
Figura 28. Caudal de aire en la estación de ventilación 01.	72
Figura 29. Caudal de aire en la estación de ventilación 02.	73
Figura 30. Caudal de aire en la estación de ventilación 03.	73
Figura 31. Caudal de aire en la estación de ventilación 04.	74

	Pág.
Figura 32. Caudal de aire en la estación de ventilación 05.	75
Figura 33. Caudal de aire en la estación de ventilación 06.	76
Figura 34. Caudal de aire en la estación de ventilación 07.	76
Figura 35. Caudal de aire en la estación de ventilación 08.	77

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Facilidades superficiales en la Plataforma 3750.	31
Foto 2. Portal & Drift.	33
Foto 3. Perforación del frente con Jumbo Sandvik DD 321.	34
Foto 4. Desatado de rocas con equipo mecanizado Scaler Normet Scamec 2000.	35
Foto 5. Sostenimiento mecanizado con Bolter Sandvik DS311	36
Foto 6. Ventiladores del 30 000 CFM instalados sobre contenedores.	37
Foto 7. Ventilador Principal 01.	63
Foto 8. Ventilador auxiliar 01.	64
Foto 9. Ventilador auxiliar 02.	65
Foto 10. Ventilador auxiliar 03.	66
Foto 11. Medición de caudal de aire con anemómetro TESTO 480.	66
Foto 12. Pizarra de ventilación con registro de concentración de gases.	67

ABREVIATURAS

CH ₄	: Metano
H ₂ S	: Ácido sulfhídrico
SO ₂	: Dióxido de azufre
CO	: Monóxido de carbono
CO ₂	: Dióxido de carbono
NO	: Monóxido de nitrógeno
NO ₂	: Dióxido de nitrógeno
H	: Hidrogeno
SENARGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
m	: Metro
DS	: Decreto supremo
EM	: Energía y Minas
TWA	: Media ponderada en el tiempo por un periodo de 8 horas
STEL	: Limite de exposición a corto plazo
ppm	: Partes por millón
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
°C	: Grados centígrados
CFM	: Pies cúbicos por minuto
HP	: Caballo de fuerza
Hum. Rel.	: Humedad Relativa
Pulg. H ₂ O	: Pulgada de agua
T	: Temperatura
V	: Velocidad
Km	: Kilómetro
Kpa	: Kilo-Pascal
Kw	: Kilowatt
Ma	: Millones de años
Min	: Minuto
VA	: Ventilador Auxiliar
VP	: Ventilador Principal
VS	: Estación de ventilación (Ventilation Station)

RESUMEN

La investigación se ha desarrollado en el Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, perteneciente a la compañía Minera Yanacocha, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca. El sistema de ventilación utilizado para la ejecución del proyecto ha evidenciado ciertas deficiencias a medida que aumenta el desarrollo de la excavación subterránea, en cuanto a caudal de aire y a las condiciones atmosféricas laborales de los trabajadores. El objetivo principal es evaluar dicho sistema y realizar una optimización. De la evaluación inicial se obtuvo una cobertura de caudal de aire de 90%, por tal motivo y de acuerdo a los requerimientos de incorporar mayor cantidad de equipos con motor petrolero, se realizó una optimización que consiste en la implementación de un sistema de ventilación del tipo aspirante con apoyo impelente, mediante la utilización de 01 ventilador principal aspirante y 03 ventiladores auxiliares impelentes, obteniendo una cobertura de caudal de aire de 129%; además para verificar el funcionamiento de acuerdo al diseño de optimización realizado en el software Ventsim, se compararon los valores de caudal de aire medidos en campo con respecto a los datos obtenidos del software Ventsim, teniendo como resultado una variación de caudal de aire en rangos de 2.0% a 5.2 %.

Palabras Claves: Túnel de Exploración, Ventilación, Caudal de aire, Sistema de ventilación, Estación de ventilación, Ventilador, Ventsim.

ABSTRACT

The research has been carried out in the Chaquicocha Level 3750 Exploration Tunnel, belonging to the Yanacocha Mining Company, located in the province and department of Cajamarca. The ventilation system used for the execution of the project has shown certain deficiencies as the development of the underground excavation increases, in terms of air flow and the working atmospheric conditions of the workers. The main objective is to evaluate this system and perform an optimization. From the initial evaluation, an air flow coverage of 90% was obtained, for this reason and according to the requirements of incorporating a greater amount of equipment with an oil engine, an optimization was carried out consisting of the implementation of a ventilation system for the type aspirant with impellent support, by using 01 main aspirating fan and 03 auxiliary auxiliary fans, obtaining an air flow coverage of 129%; in addition to verify the operation according to the optimization design made in the Ventsim software, the air flow values measured in the field were compared with the data obtained from the Ventsim software, resulting in a variation of air flow in ranges of 2.0% to 5.2%.

Keywords: Exploration Drift, Ventilation, Airflow, Ventilation System, Ventilation Station, Fan, Ventsim.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La ventilación de minas consiste en distribuir y encausar la circulación de volúmenes de aire dentro de las operaciones mineras del modo más económico, ya sea por medios naturales o mecánicos, a fin de satisfacer las necesidades de oxígeno del personal, de los equipos y además de poder diluir y transportar los contaminantes sólidos y gaseosos para que no afecte la capacidad de trabajo y salud del trabajador, sino más bien mejoren las condiciones ambientales y termo ambientales de la mina a concentraciones y temperaturas aceptables.

El Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, cuenta con un sistema de ventilación del tipo impelente, con el que se realizó un desarrollo de 230 m desde la bocamina, pero a medida que se incrementa el desarrollo de las labores subterráneas, se tiene la necesidad de incorporar mayor cantidad de equipos con motor petrolero para el desarrollo total del proyecto y la vez buscar un sistema de ventilación que mejore las condiciones laborales de los trabajadores; es por ello que el presente trabajo de investigación busca evaluar la situación actual del sistema de ventilación y desarrollar una propuesta de optimización para la ejecución total del proyecto.

A partir de ello, se plantea la siguiente incógnita: ¿Cuál es la optimización a partir de la evaluación del sistema de ventilación del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750 - Minera Yanacocha?, basado en esto, la presente investigación pretende comprobar que: A partir de la evaluación de la situación actual del sistema de ventilación del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, es posible realizar una optimización, de tal forma que permita tener una correcta cobertura de caudal de aire en todas las labores según los requerimientos que se tengan.

Asimismo, el presente trabajo de investigación se justifica porque surge la necesidad de evaluar la situación actual del sistema de ventilación, mediante el cálculo de requerimiento

de caudal de aire y la posterior medición en campo, para luego determinar si el sistema de ventilación es el adecuado para continuar con las operaciones o si se debe generar una propuesta de optimización, asegurando que se cumplan con los requerimientos de caudal de aire.

Como objetivo general se tiene: Evaluar y optimizar el sistema de ventilación del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750 - Minera Yanacocha. Para mayor detalle de la investigación, se tiene como objetivos específicos: Realizar la evaluación del sistema de ventilación inicial, realizar la evaluación del sistema de ventilación implementado y analizar la variación del caudal de aire entre los valores obtenidos del modelo en Ventsim y los datos medidos en campo del sistema de ventilación implementado.

La investigación se organizó en cinco capítulos donde se incluye sus respectivos ítems, como se muestra en el índice de contenido.

En el capítulo I, hace referencia al planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, delimitación y los objetivos de la investigación.

En el capítulo II, se presenta el marco teórico con los antecedentes teóricos de la investigación, bases teóricas en las cuales se ha fundamentado la investigación y la definición de términos básicos.

En el capítulo III, se realiza un detalle de los materiales y métodos describiendo la ubicación geográfica de la zona de estudio, el procedimiento a seguir, el análisis de datos obtenidos en campo, además se realiza la evaluación y la optimización del sistema de ventilación.

En el capítulo IV, se realiza el análisis y discusión de resultados, exponiendo los resultados obtenidos y contrastándose con la hipótesis.

En el capítulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado en el estudio de investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Córdova y Molina (2011). En su artículo titulado, Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea, señalan que para garantizar un control óptimo de las condiciones de la mina debe hacerse un seguimiento mediante estaciones de ventilación, para realizar mediciones de caudal de aire y temperatura. Los autores concluyen que para caracterizar un sistema de ventilación es necesario conocer las características del circuito, es decir la distribución de caudales de aire, requerimientos de ventilación, áreas y perímetros de las estaciones de ventilación, entre otros.

Carabajo (2015). En su estudio titulado, Diseño del circuito de ventilación de la zona norte de la Mina Cabo de Hornos, ubicada en el distrito aurífero - polimetálico Portovelo – Zarumala, concluye que la concentración de gases aumenta en los sectores más profundos de una mina, en los sitios en donde se realizan las operaciones de desarrollo, debido a la utilización de equipos con motores de combustión interna, ambiente que dificulta el eficiente desempeño de los trabajadores y deteriora las condiciones laborales.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Agüero y Álvarez (2012). En su investigación denominada, Influencia de la ventilación natural y mecánica en el diseño del sistema de ventilación de las galerías del nivel 1950 Mina Calpa – Arequipa, los autores concluyen que el caudal necesario y la presión que se genera en la mina serán los datos primordiales para el dimensionamiento de los equipos de ventilación, es por ello que un buen cálculo de la red de ventilación implica una selección más adecuada de los ventiladores.

Claverias (2014). Desarrolló una investigación titulada, Evaluación y optimización del sistema de ventilación de la Compañía Minera Caraveli S.A.C aplicando el software Ventsim Visual 3, concluye que para realizar la evaluación del sistema de ventilación, es importante reducir al mínimo cualquier cambio en el sistema de ventilación, para lo cual se deben reparar las puertas y tapones de ventilación, ya que durante el estudio podría arrojar resultados confusos. Además menciona de que mientras se realizan las mediciones se tiene que mantener la mina lo más estática posible, para que se puedan obtener datos más exactos en el monitoreo.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Atmosfera de mina

La composición del aire atmosférico en un lugar situado al nivel del mar, es:

Nitrógeno.....	78.08%
Oxígeno.....	20.95%
Anhídrido carbónico.....	00.03%
Argón.....	00.93%
Otros gases.....	00.01%

Esta composición del aire cambia, al recorrer la mina por las diferentes labores, del tal forma que la cantidad de oxígeno disminuye, la del anhídrido carbónico aumenta. Además, se agregan al aire diversos gases (CH_4 , H_2S , SO_2 , CO , H), vapores y polvo. Se considera que el aire de minas se compone de aire atmosférico, de gases activos (gases explosivos o nocivos que se forman en las labores mineras) y de aire muerto (mezcla de dióxido de carbono 5-15% y nitrógeno 95-85%). (Novistky, 1962).

2.2.2. Métodos de ventilación de minas

a) Ventilación natural

Para que la ventilación natural funcione tiene que existir una diferencia de alturas entre las bocaminas de entrada y salida. Siendo el factor determinante más importante el

intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior de la mina. La energía térmica agregada al sistema genera presión en el sistema, produciendo un flujo de aire, debido al desplazamiento del aire caliente por el aire frío. (SERNAGEOMIN, 2008)

La ventilación natural en las minas se debe a la diferencia de peso específico del aire entrante y saliente. La diferencia de peso específico proviene principalmente de la diferencia de temperatura del aire, y en menor grado de la diferencia de presión, además también tiene influencia el porcentaje de humedad y la composición química del aire. Esta ventilación es irregular durante todo el día, no es confiable y trabaja en minas de poca profundidad hasta unos 600 m o en minería artesanal, siendo afectada por los vientos externos que son cambiantes durante el día y por las estaciones. Esta ventilación ocasiona problemas por no ser constante y es mejor medirla en las bocaminas a diferentes horas y días que calcularla teóricamente. (Jiménez, 2011).

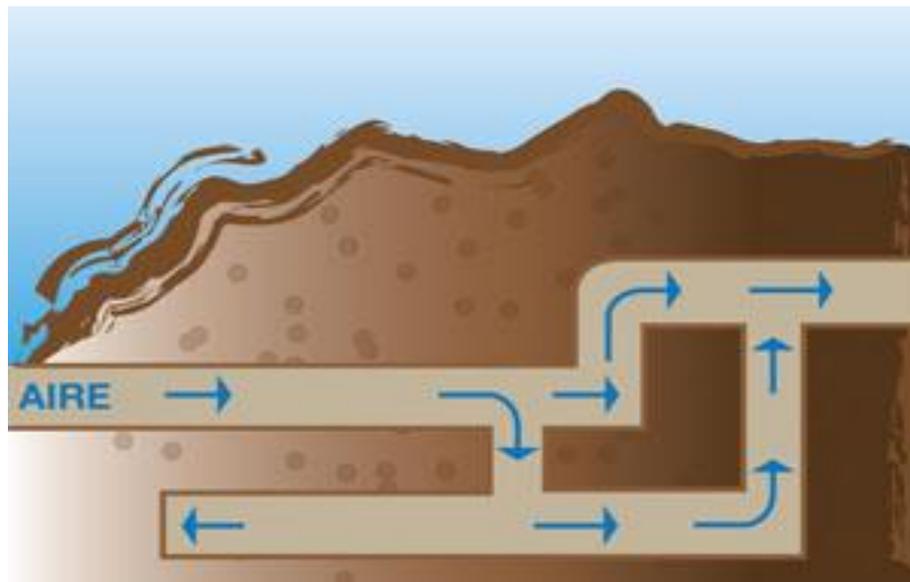


Figura 1. Esquema de ventilación natural. (SERNAGEOMIN, 2008).

b) Ventilación mecánica

La ventilación mecánica es generada por la presión que ejerce un ventilador sobre cierto volumen de aire, el cual dependiendo de sus características puede forzar el ingreso de aire fresco o extraer el aire viciado; la ventilación mecánica permite una presión constante sobre el aire y cierta cantidad de volumen fijo, ya que son accionados por un motor

eléctrico y son seleccionados de acuerdo al diseño del sistema de ventilación con el fin de asegurar el ritmo de las operaciones y los ciclos de trabajo. Este tipo de ventilación es más cara por lo que requiere energía eléctrica para su funcionamiento, por tal motivo el objetivo es poder diluir y trasladar contaminantes, además de brindar confortabilidad al personal al más bajo costo de operación. (Jiménez, 2011).

2.2.3. Sistemas de ventilación

a) Sistema de ventilación impelente

El aire es forzado hacia el tope de la labor mediante un ducto de ventilación, el cual es impulsado mediante ventiladores, lo cual desplaza la masa de aire viciado a través de la galería. Este es el sistema predominante usado en la mayoría de las minas subterráneas. (SERNAGEOMIN, 2008).

Este sistema permite el uso de conductos flexibles no reforzados, que tienen una superficie interior lisa. Estos conductos son más económicos y manejables, además presentan una menor resistencia la paso del aire. (López, 2011).

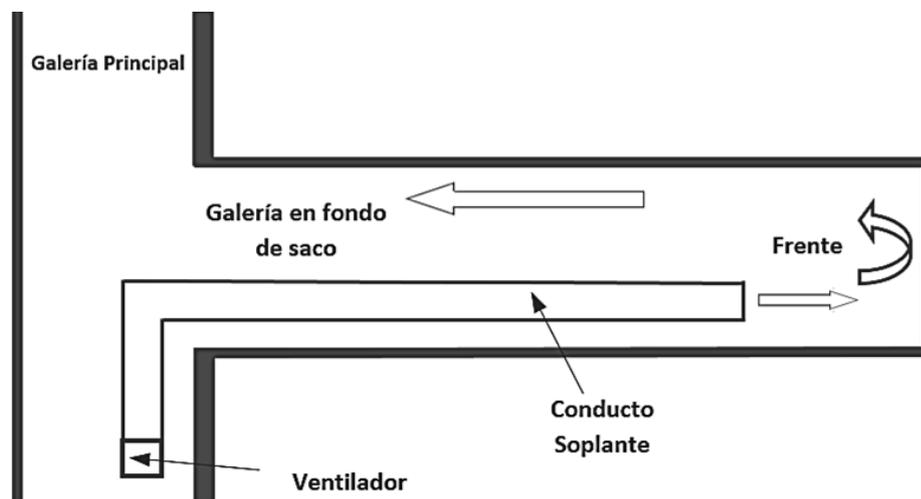


Figura 2. Sistema de ventilación impelente. (López, 2011).

La corriente de aire limpio, al entrar en contacto con los gases que hay en el frente genera una mezcla turbulenta con cual se asegura la eliminación de una posible acumulación o estratificación de gases en zonas próximas a tope de la labor. El final del conducto debe

estar situada a una distancia adecuada del frente, de modo que la zona de barrido se extienda hasta este. Si la distancia es excesiva, se crea una zona muerta, en la que el aire se acolchona y no se renueva. (López, 2011).

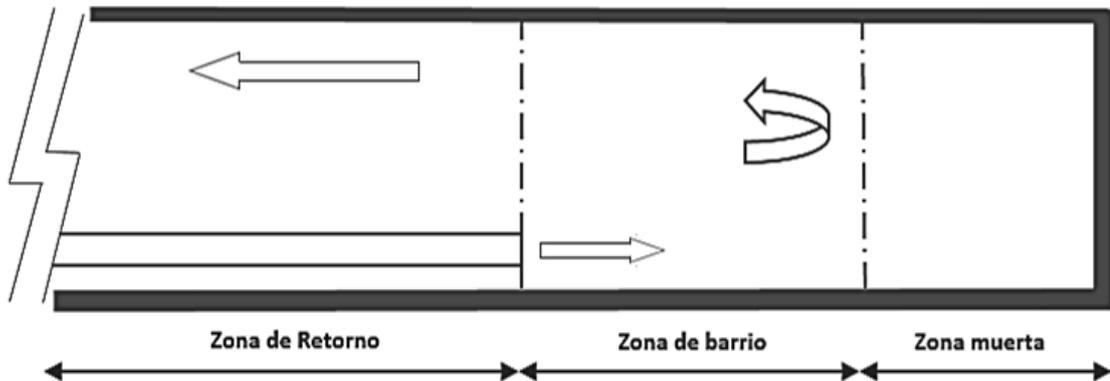


Figura 3. Zonas del sistema de ventilación impelente. (López, 2011).

b) Sistema de ventilación aspirante

El aire contaminado del frente es succionado mediante el conducto de ventilación, creando una depresión y haciendo ingresar aire fresco a través de la galería. (SERNAGEOMIN, 2008).

El aire fresco ingresa hacia el frente a través de la galería, la cual tiene una sección mucho mayor que el conducto de ventilación, por lo tanto la velocidad y turbulencia del aire fresco será mucho menor; es así que un sistema aspirante por sí solo no es capaz de garantizar un buen barrido del tope, si este es de gran sección o si el conducto de aspiración no está situada en el mismo frente. Por ello, es conveniente adoptar una solución mixta, con un ventilador de refuerzo impelente que cree una turbulencia adecuada para garantizar la dilución de gases. El sistema requiere un conducto rígido (fabricado en acero, plástico o fibra de vidrio) o un conducto flexible reforzado. Si los sistemas requieren un gran caudal, su ejecución práctica puede ser problemática técnicamente hablando, ya que necesitan presiones muy elevadas que conducen a la utilización de varios ventiladores en serie. (López, 2011).

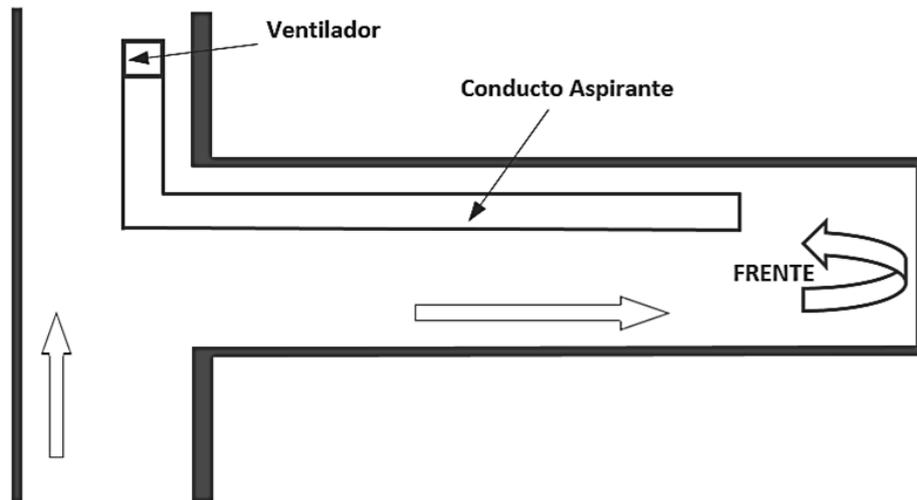


Figura 4. Sistema de ventilación aspirante. (López, 2011).

c) Sistema impelente con apoyo aspirante

Es también denominado sistema solapado, el cual utiliza un ventilador auxiliar de refuerzo, situado frente a la labor, con un tramo de conducto de poca longitud. Estos sistemas combinan las ventajas de cada sistema, consiguiendo el mejor efecto de ventilación en situaciones concretas. El sistema consiste en una línea principal impelente con solape aspirante, cuya función por lo general es la de recoger y evacuar el polvo generado del frente. (López, 2011).

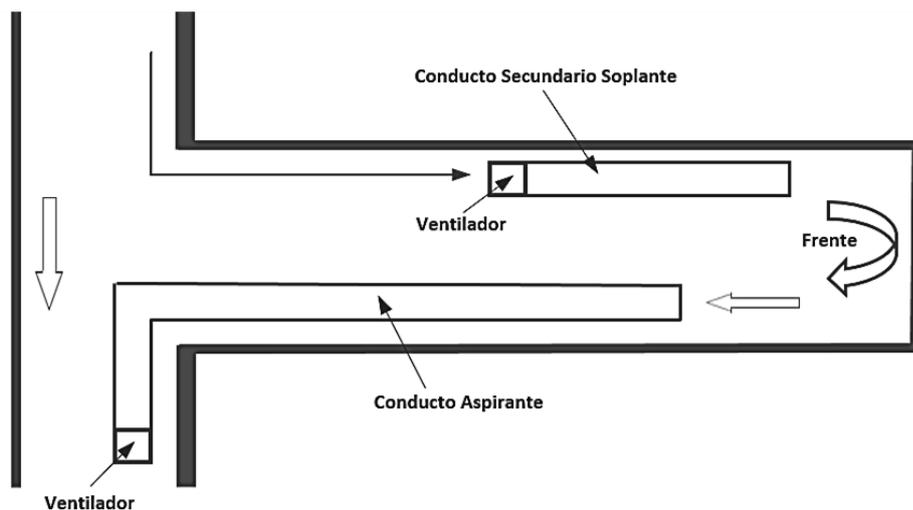


Figura 5. Sistema de ventilación mixta. (López, 2011).

d) Sistema aspirante con apoyo impelente

El sistema aspirante principal extrae el aire viciado mediante conductos rígidos de ventilación, de esta manera forzando el ingreso de aire fresco a través de la galería; mientras que la función del ventilador auxiliar de refuerzo (impelente) es la de captar el aire de la galería y direccionarlo hacia el frente de la labor para asegurar un buen barrido, evitando la formación de zonas muertas. (López, 2011).

El sistema reúne las ventajas de los dos sistemas básicos, en cuanto a mantener la galería y el frente en desarrollo con una renovación constante de aire limpio y diluyendo con mayor efectividad los gases producidos por las voladuras, con la desventaja de su mayor costo de instalación y manutención. (SERNAGEOMIN, 2008).

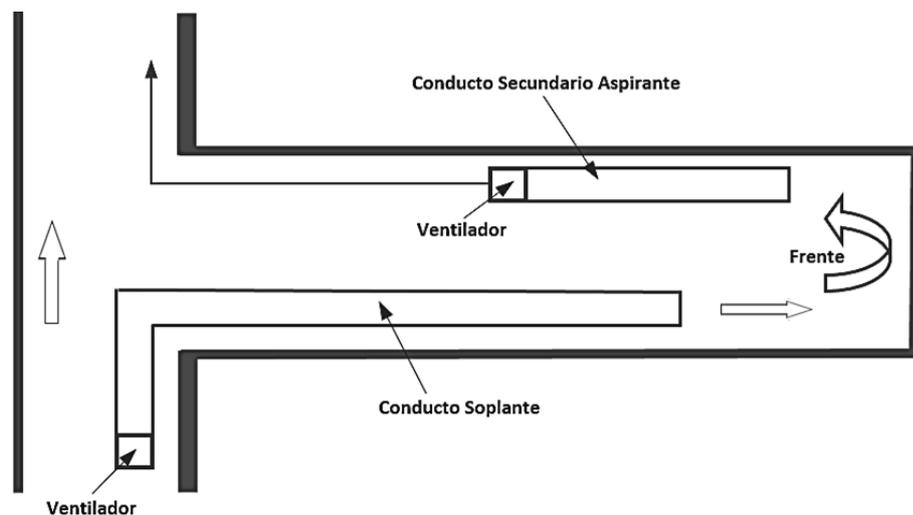


Figura 6. Sistema aspirante con apoyo impelente. (López, 2011).

2.2.4. Ventiladores, tipos y diferencias

Un ventilador es una máquina que transmite energía a un caudal de aire determinado, produciendo el incremento de presión necesaria (Presión Total) para mantener un flujo constante de dicho fluido. Para realizar este trabajo el ventilador requiere de una potencia en el eje del motor que lo acciona, que viene dada por la expresión:

$$Potencia [vatios] = \frac{Caudal[m^3/s] \times Presión\ Total [Pa]}{\eta_{ventilador} [\%]}$$

Cada ventilador tiene definido una curva característica, en la cual se muestra el lugar geométrico de los puntos de funcionamiento para cada ángulo de regulación de los álabes. Por lo tanto, se tiene una curva característica distinta para cada ángulo. El punto de corte de la curva característica con la resistencia del circuito es el punto de funcionamiento del ventilador. (Zitrón, 2010).

a) Ventilador centrífugo

En los ventiladores centrífugos el aire entra por un oído central y es aspirado por centrifugación en una rueda de alabes, de donde es impulsado a un cuerpo en forma de caracol, llamado voluta, cuya sección va creciendo hasta alcanzar el orificio de salida en la zona llamada difusor. (Luque, 1988).

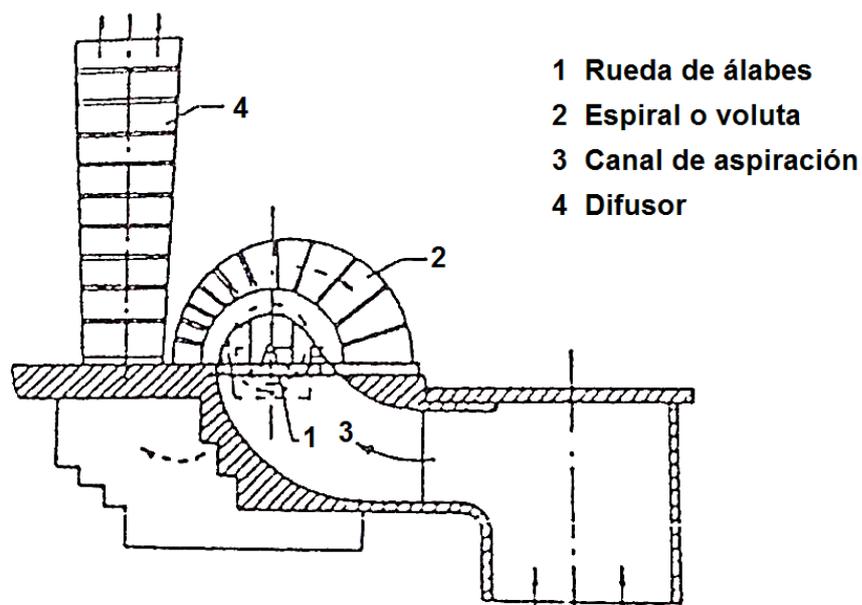


Figura 7. Partes de un ventilador centrífugo. (Luque, 1988).

El ventilador centrífugo consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado por el rotor y arrojado contra la envolvente. Estos ventiladores son de flujo radial. La trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. (Zitrón, 2010).



Figura 8. Ventilador centrífugo. (Zitrón, 2010).

b) Ventilador axial

Los ventiladores axiales comprenden un conducto de forma cilíndrica, una hélice con cierto número de paletas fijadas sobre un cubo o haciendo cuerpo con él. El aire entra y sale paralelamente a la máquina. (Luque, 1988).

El ventilador axial es de diseño aerodinámico. Este tipo de ventilador consiste esencialmente en un rodete alojado en una envolvente cilíndrica o carcasa. La adición de álabes-guía, detrás del rotor, convierte al ventilador turbo-axial en un ventilador axial con aletas guía. Pueden funcionar en un amplio rango de volúmenes de aire, a presiones estáticas que van de bajas a moderadamente altas y es capaz de desarrollar mayores presiones estáticas que el ventilador centrífugo a la vez que es mucho más eficiente. Los álabes-guía, en la succión o en la descarga, o en ambas partes, se han añadido para enderezar el flujo del aire fuera de la unidad a la vez que sirven de apoyo en el diseño. (Zitrón, 2010).



Figura 9. Ventilador axial. (Zitrón, 2010).

c) Comparativo de ventiladores axiales frente a ventiladores centrífugos

Zitrón (2010) establece que las diferencias que se tiene al utilizar un ventilador axial frente a un centrífugo son las siguientes:

- Un ventilador axial tiene más versatilidad en la regulación que un ventilador centrífugo, debido a que es posible actuar sobre el ángulo de posición de los álabes y sobre la velocidad de rotación con un variador de frecuencia, pudiendo alcanzar una gran gama de puntos de funcionamiento, mientras que el ventilador centrífugo tiene regulación por velocidad, y si queremos conseguir otro punto de funcionamiento, será a base de aumentar la resistencia del circuito, lo que significaría un incremento de potencia debido a la regulación.
- Mayor rendimiento mecánico de los ventiladores axiales, ya que los ventiladores centrífugos transmiten el movimiento desde motor al rodete con transmisión por correas o mediante otros tipos transmisiones. Esto implica una serie de complicaciones adicionales frente a un ventilador axial, ya que además de la pérdida de rendimiento por transmisión, podrían aparecer más frecuentemente fenómenos de vibraciones debido a que es un sistema mecánico más complejo.

- En ciertos ventiladores centrífugos se plantean problemas en la transmisión como puede ser el deslizamiento de la correa, destensado, exceso de tensado que repercute sobre los rodamientos, y con cierto peligro de rotura de las correas cuando están expuestas a temperaturas extremas.
- Un ventilador axial, para las mismas características de presión y caudal, requiere menor espacio físico que un ventilador centrífugo, ya que por el diseño puede utilizar motores de mayor velocidad. El ventilador centrífugo al contrario, necesita cimentaciones mayores para el ventilador, incrementando el costo de la instalación significativamente.
- La presencia de agua para los ventiladores centrífugos, ya que el rodete de estos, presentan en su configuración huecos que acumulan agua mientras trabajan, generando un desequilibrio en el ventilador, llegando a producir vibraciones.

2.2.5. Normas legales que sustentan el estudio

a) Consideraciones legales

El Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería aprobado por DS- 024-2016-EM así como su modificatoria según el DS-023-2017-EM, el mismo que entre otros aspectos se refiere a los derechos y obligaciones de los titulares mineros, la gestión de la seguridad y salud ocupacional en la gestión de las operaciones mineras.

De este reglamento, entre los artículos del 246 al 259 hace referencia a todo lo relacionado a la ventilación tanto en minas subterráneas metálicas como de carbón, regulando y normando los parámetros de requerimiento de caudales de aire por personas y por equipos diésel, velocidad del aire dentro de las labores subterráneas según tipo de explosivo utilizado, características de ventiladores principales y secundarios en minas metálicas y de carbón así como otras consideraciones.

b) Consideraciones de seguridad y salud ocupacional

Airtec (2018) tiene las siguientes consideraciones de seguridad y salud ocupacional, con respecto a estudios de ventilación de minas:

- Solo se toman en cuenta gases producto de la voladura y por utilización de equipos con motor petrolero. No se conocen gases producto de las emanaciones que provienen del subsuelo (gases dormidos).
- El gas de más alta peligrosidad lo constituye el monóxido de carbono (CO), el mismo que es eliminado mediante una buena ventilación.
- El dióxido de carbono (CO₂) es más tolerable, lo proporciona los equipos diésel, también son superados con los caudales de aire necesarios que deben circular en los ambientes de trabajo.
- Los gases contaminantes presentes durante las actividades mineras se pueden originar por diversos motivos, entre ellos tenemos: gases de voladura, máquinas de combustión interna, fuegos y explosiones, respiración humana, descomposición de elementos orgánicos.

Tabla 1. Gases presentes en actividades mineras.

Compuesto	Fórmula	Densidad relativa	Observaciones
Monóxido de carbono	CO	0.97	Gas incoloro, inodoro e insípido, se le ubica en las partes altas de la labor.
Dióxido de carbono	CO ₂	1.53	Gas incoloro, sabor ligeramente ácido, se le ubica a partir de la parte media hacia debajo de la labor
Gases nitrosos	NO ₂ y NO	1.78	Gas incoloro en concentraciones bajas, en altas toma un color pardo rojizo. Son irritables. Se ubica en las partes bajas de la labor
Gases sulfurosos	SO ₂	2	Gas incoloro, sofocante, de olor a huevos podridos, irritante, se presenta en menor proporción y está referido a los cargadores de batería.

Fuente: Airtec, (2018).

- También se debe tener en cuenta que los gases contaminantes, debido a su densidad se distribuyen de manera típica como se indica en la figura 10.

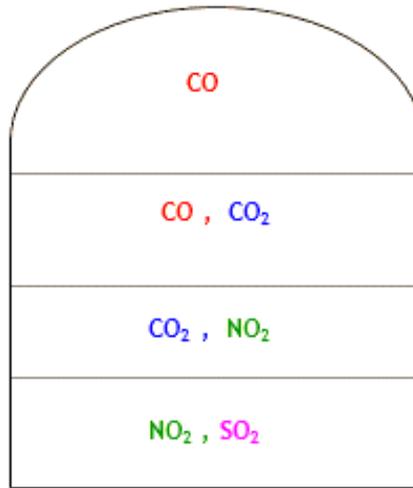


Figura 10. Ubicación típica de los gases de acuerdo a su densidad (Airtec, 2018).

c) Calidad de aire

Para asegurar la calidad de aire en el interior de la mina, se deben mantener las concentraciones de gases por debajo de los límites máximos permisibles (LMP), de tal manera como se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Límites de exposición ocupacional para agentes químicos

N°	Agentes Químicos (en el aire)	Límites de Exposición Ocupacional					
		TWA		STEL		Techo (C)	
7	Anhídrido Sulfuroso (SO ₂)	2	ppm	5	ppm		
20	Dióxido de Carbono	5000	ppm	30000	ppm		
21	Dióxido de Nitrógeno	3	ppm	5	ppm		
33	Monóxido de Carbono (CO)	25	ppm				
36	Oxígeno (O ₂)	19.5	%			22.5	%

Fuente: Anexo N° 15 del DS-24-2016-EM, (2016).

2.2.6. Requerimiento de aire

Para el cálculo del requerimiento de caudal de aire, se considera la aplicación del ANEXO 38 del DS-024-2016-EM del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería así como su modificatoria según el DS-023-2017-EM.

Cuando en la operación se utilice equipos con motor petrolero: La demanda de aire al interior de la mina debe ser calculada de acuerdo al literal d) del artículo 252 del reglamento, considerando la fórmula siguiente:

$$Q_{T0} = Q_{T1} + Q_{Fu}$$

Donde:

Q_{T0} = Caudal total para la operación

Q_{T1} = La sumatoria de caudal requerido por: a) El número de trabajadores (Q_{Tr}), b) el consumo de madera (Q_{Ma}), c) temperatura en labores de trabajo (Q_{Te}) y d) equipos con motor petrolero (Q_{Eq})

Q_{Fu} = 15% del Q_{T1}

a) Caudal requerido por el número de trabajadores

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

Donde:

Q_{Tr} = Caudal total para “n” trabajadores (m³/min)

F = Caudal mínimo por persona de acuerdo a escala establecida en el artículo 247 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería

N = Número de trabajadores de la guardia más numerosa

El artículo 247 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería establece: En los lugares de trabajo de las minas ubicadas hasta mil quinientos (1,500) metros sobre el nivel del mar, la cantidad mínima de aire necesario por hombre será de tres metros cúbicos por minuto (3 m³/min).

En otras altitudes la cantidad de aire será de acuerdo a la siguiente escala:

- De 1,500 a 3,000 msnm aumentará en 40% que será igual a 4 m³/min
- De 3,000 a 4,000 msnm aumentará en 70% que será igual a 5 m³/min
- Sobre los 4,000 msnm aumentará en 100% que será igual a 6 m³/min

b) Caudal requerido por el consumo de madera

$$Q_{Ma} = T \times u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Ma} = Caudal requerido por toneladas de producción (m³/min)

u = Factor de producción, de acuerdo a escala establecida en el segundo párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia

Tabla 3. Factor de producción de acuerdo al consumo de madera

Consumo de madera (%)	Factor de producción (m ³ /min)
< 20	0
20 a 40	0.6
41 a 70	1
> 70	1.25

Fuente: Anexo N° 38 del DS-024-2016-EM y su modificatoria el DS-023-2017-EM, (2017).

c) Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo

$$Q_{Te} = V_m \times A \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Te} = Caudal por temperatura (m^3/min)

V_m = Velocidad mínima

A = Área de la labor promedio

N = Número de niveles con temperatura mayor a $23^\circ C$, de acuerdo a escala establecida en el tercer párrafo del literal d) del artículo 252 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería.

Tabla 4. Velocidad mínima.

Temperatura seca ($^\circ C$)	Velocidad mínima (m/min)
< 24	0
24 a 29	30

Fuente: Anexo N° 38 del DS-024-2016-EM y su modificatoria el DS-023-2017-EM, (2017).

d) Caudal requerido por equipo con motor petrolero

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times D_m \times F_u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Eq} = Volumen de aire necesario para la ventilación (m^3/min)

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs)

D_m = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%)

F_u = Factor de utilización promedio de los equipos (%)

e) Caudal requerido por fugas

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{T1} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

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

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Ventilación de minas: Es arte y ciencia que trata de distribuir y encausar la circulación de volúmenes de aire dentro de las operaciones mineras del modo más económico, ya sea por medios naturales o mecánicos. (Jiménez, 2011).

Volumen de aire: Es la cantidad de aire que fluye a través de la mina o segmento de la mina, en pies cúbicos por minuto. La cantidad de aire es el producto de la velocidad de aire multiplicado por el área transversal del conducto de ventilación, $q = V \times A$. (Kingery, 1960).

Velocidad del aire. V es el ratio de flujo de aire y es medida por anemómetros u otros instrumentos. (Kingery, 1960).

Área de la sección. A es el área transversal de entrada o conducto a través del cual fluye el aire. (Kingery, 1960).

Presión estática: Es la presión potencial ejercida en todas las direcciones por un flujo en reposo. Para un fluido en movimiento se mide en la dirección perpendicular a la del flujo, tendencia a dilatar o colapsar al ducto en unidades en pulgadas de agua - pulg.H₂O. (Airtec, 2017).

Presión dinámica: Es la presión cinética en la dirección del flujo necesaria para hacer que un fluido en reposo fluya a una determinada velocidad en unidades en pulgadas de agua - pulg.H₂O. (Airtec, 2017).

Presión Total: Suma algebraica de las presiones estáticas y dinámicas. Los resultados para la definición del modelo de ventilador se expresarán en unidades inglesas Pulgadas de agua en unidades en pulgadas de agua - pulg.H₂O. (Airtec, 2017).

Potencia en el Eje: Potencia realmente requerida para la operación de un ventilador, no incluye las pérdidas en la transmisión entre el motor y el rotor. (Airtec, 2017).

Temperatura ambiente y humedad relativa: Son factores que contribuyen a mejorar el medio ambiente de trabajo en interior de mina (comfort). En condiciones de depresión natural (por cambio de temperatura en el medio externo) el movimiento del aire en interior de mina se puede hacer lento o rápido incluso la dirección de los circuitos puede invertirse. (Airtec, 2017).

Distribución de volumen de aire: Es la actividad que frecuentemente ocurre en mina y es la distribución del flujo principal que viaja por una galería hacia otras galerías o chimeneas, de modo que el volumen que ingresa por el punto es igual a los volúmenes que salen por este punto o llamada ley de equilibrio o distribución. Esta distribución es natural o regulada. (Jiménez, 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

Minera Yanacocha, se encuentra ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca, en la sierra norte del Perú, a 800 Km al noroeste de la ciudad de Lima. Su zona de operaciones está a 32 km al norte del distrito de Cajamarca, entre los 3500 y 4100 msnm. El centro geográfico tiene aproximadamente las siguientes coordenadas en el sistema UTM: 774 260 E, 9 227 050 N. En la figura 11 se muestra la ubicación de Minera Yanacocha.

El Túnel de Exploración Chaquicocha se encuentra ubicado dentro del tajo abierto del mismo nombre; la bocamina se ubica en la zona seca del tajo a una elevación de 3750 msnm, y se muestra en la figura 12.

3.2. ACCESIBILIDAD

El acceso a Minera Yanacocha desde la ciudad de Cajamarca es por medio de la carretera Cajamarca-Bambamarca, a una distancia promedio de 32 km, el tiempo de viaje desde Cajamarca hasta Minera Yanacocha (Garita Huandoy) es de aproximadamente 60 min.

El acceso hacia la ciudad de Cajamarca desde Lima (capital del Perú) puede ser mediante:

- a) **Vía terrestre:** Puede realizarse en bus mediante un recorrido de 800 Km de distancia y un tiempo aproximado de 18 horas de viaje, a través de la carretera Panamericana Norte.

- b) **Vía aérea:** Existen vuelos comerciales desde Lima (Aeropuerto Internacional Jorge Chávez) hacia Cajamarca (Aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias), empleando aproximadamente 1 hora de viaje.

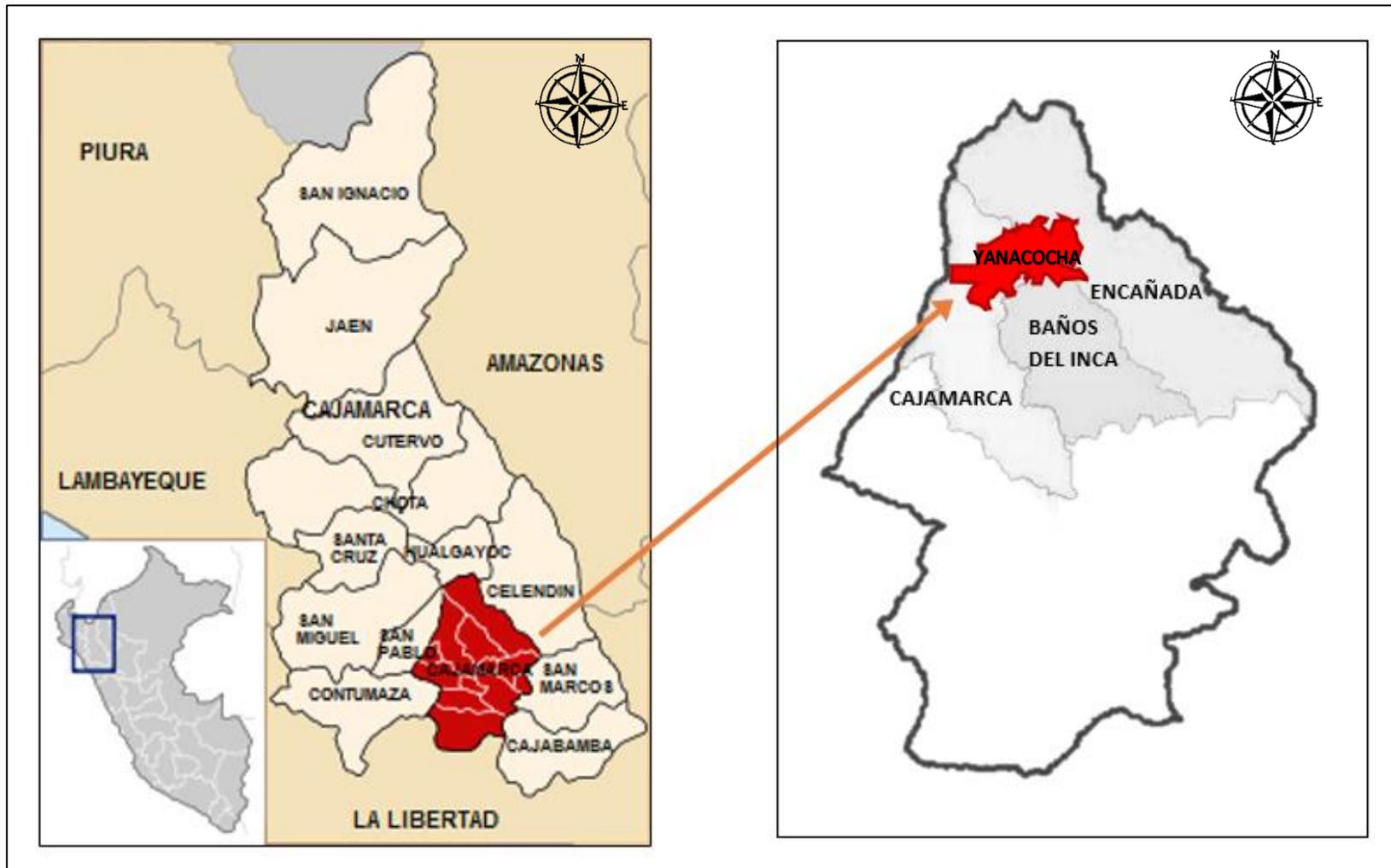


Figura 11. Ubicación de Minera Yanacocha.

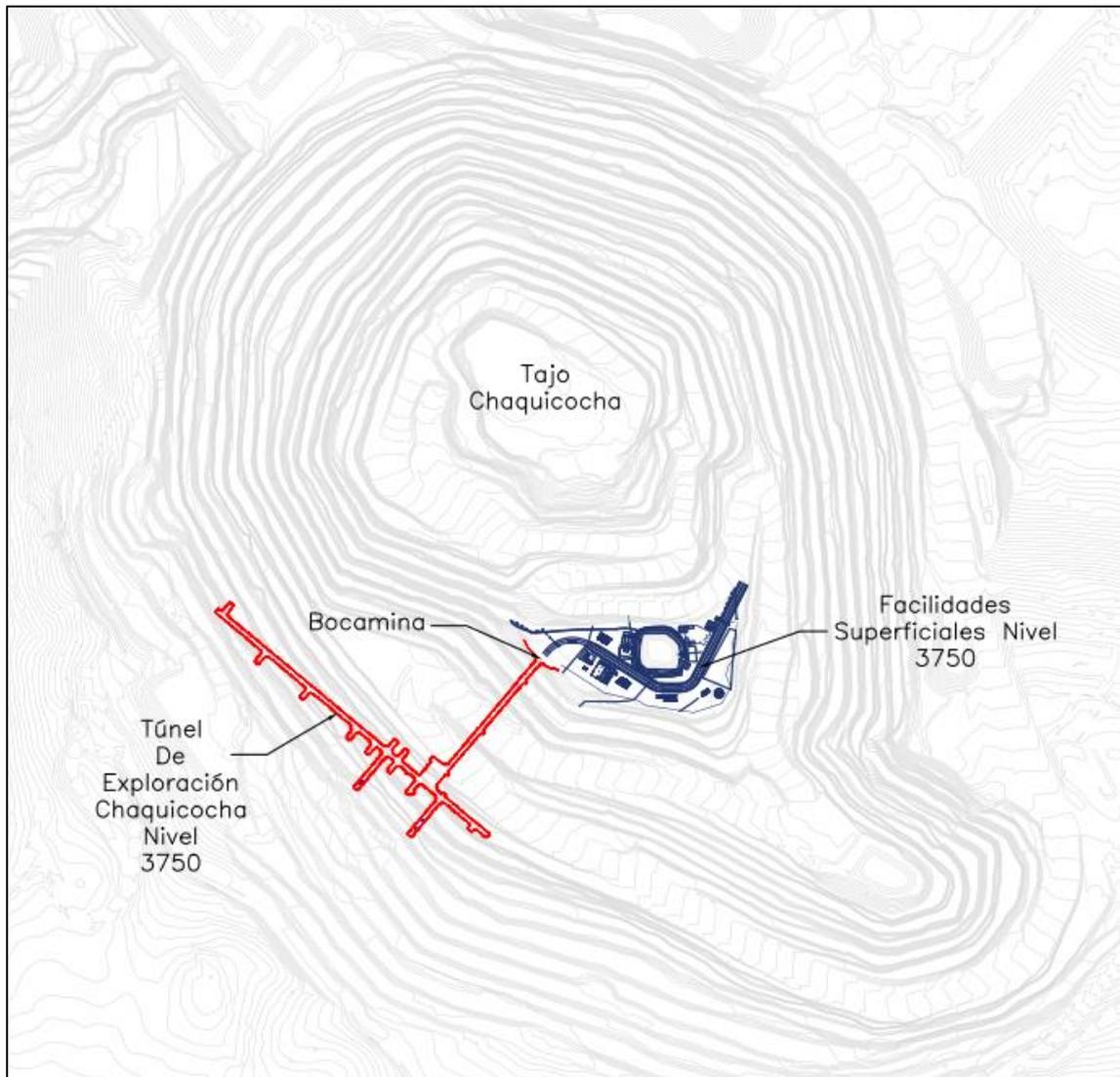


Figura 12. Ubicación del Túnel de Exploración Chaquicocha en AutoCAD.

3.3. CLIMA

El clima del área de estudio es típico de las regiones andinas cercanas al ecuador: fresco y húmedo, con una temporada distintiva de lluvias. Las condiciones son a menudo de mucho viento, especialmente a gran altura. (Saldaña, 2013).

El clima es frígido llegando a temperaturas menores a 3°C, dando lugar a continuas heladas en la temporada de lluvias. En la temporada seca se tiene intenso sol, fuertes vientos y temperaturas mayores a 20°C. (Basurto, 2014).

3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1. Definición de variables

Las variables que intervienen en la investigación se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Variables de la investigación.

Variables	
Variable independiente (Causa)	Variable dependiente (Efecto)
Caudal de aire	Optimización del sistema de ventilación

3.4.2. Tipo y método de la investigación

La investigación es de tipo explicativo, correlacional y transversal.

Por otro lado, el método de investigación es: deductiva- inductiva.

3.4.3. Población de estudio

Túnel de Exploración Chaquicocha Nv. 3750 (817 m de longitud).

3.4.4. Muestra

Ocho estaciones de ventilación, ubicadas en la galería principal del Túnel de Exploración.

3.4.5. Unidad de análisis

Velocidad de aire, caudal de aire, temperatura y humedad relativa.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1. Técnicas

- **Análisis documental:** consiste en la recopilación de planos del sistema de ventilación, especificaciones técnicas de los ventiladores, diseño final del Túnel de Exploración, número de personas, número de equipos y características, así como toda la información correspondiente al proyecto.
- **Observación directa:** consta de la verificación de las zonas más adecuadas para determinar las estaciones de ventilación, considerando que no presenten mucha sobrerotura y estén ubicadas estratégicamente; además de la inspección del estado de los conductos de ventilación.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos

- **Formatos de mediciones de ventilación:** para anotar los datos de velocidades de aire, sección transversal, temperatura y humedad relativa; en cada estación de ventilación.

3.5.3. Materiales y equipos

- **Cámara fotográfica digital Sony (25 Mpx):** se utilizó para tomar fotografías de los ventiladores principales, ventiladores auxiliares, conductos de ventilación, entre otros.
- **Laptop HP G-42:** se utilizó para poder realizar las simulaciones del sistema de ventilación en el software Ventsim, así como el procesamiento de la información obtenida en campo.
- **Anemómetro Kestrel 4200:** para obtener datos de temperatura y humedad relativa en las estaciones de ventilación.
- **Anemómetro Testo 480:** para medir la velocidad de aire en cada una de las estaciones de ventilación.

- **Detector multigas portátil IBRID MX6:** para monitorear las condiciones de la atmosfera de la mina, mientras se realizan las mediciones en las estaciones de ventilación.
- **Estación Total Leica TS 09:** para realizar el levantamiento topográfico de la sección transversal de las estaciones de ventilación.

3.5.4. Softwares

- Ventsim v4.8
- AutoCAD 2018
- Microsoft Office 2013

3.6. PROCEDIMIENTO

3.6.1. Evaluación del sistema de ventilación inicial

a) Etapa de campo

Esta etapa se realizaron las mediciones de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa con ayuda de los anemómetros Kestrel 5200 y Testo 480, para cada uno de las estaciones de ventilación establecidos; además de realizó el levantamiento topográfico de cada estación de ventilación con apoyo de una estación total.

b) Etapa de gabinete

Se realizó el cálculo de caudal aire, así como el procesamiento de todos los datos obtenidos en campo de cada estación de ventilación.

Los valores de caudal de aire de las mediciones se compararon con los requerimientos de caudal de aire teóricos calculados de acuerdo al ANEXO 38 del DS-024-2016-EM del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería así como su modificatoria según el DS-023-2017-EM, con el objetivo de evaluar el sistema de ventilación inicial.

3.6.2. Optimización del sistema de ventilación

a) Etapa preliminar de gabinete

En esta etapa se realizaron los cálculos de requerimientos de caudal de aire de acuerdo al ANEXO 38 del DS-024-2016-EM del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería así como su modificatoria según el DS-023-2017-EM, considerando la incorporación de nuevos equipos con motor petrolero para la propuesta de optimización del sistema de ventilación del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750.

A partir de los cálculos de caudal de aire requeridos se pudo dimensionar la capacidad del ventilador principal y de los ventiladores auxiliares, posteriormente se realizó la simulación del sistema de ventilación con el software Ventsim para poder determinar las especificaciones de los ventiladores, estas especificaciones fueron proveídas al fabricante, quienes determinaron las especificaciones bajo las cuales los ventiladores fueron fabricados.

Finalmente con los datos de las especificaciones de los ventiladores entregados por el fabricante se ajustó el modelo en el software Ventsim y se pudo analizar el funcionamiento de la propuesta de optimización del sistema de ventilación.

b) Etapa de campo

En esta etapa se realizó la instalación del ventilador principal y los ventiladores auxiliares, así como de los ductos rígidos y las mangas flexibles de ventilación de la propuesta de optimización del sistema de ventilación

Además se llevó a cabo el monitoreo de la puesta en marcha del sistema de ventilación implementado, a través de las mediciones de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa, para cada uno de las estaciones de ventilación establecidas; y se realizó el levantamiento topográfico de cada estación de ventilación con apoyo de una estación total.

c) Etapa de gabinete

Con los con los datos de velocidad de aire y el área de la sección transversal de cada estación de ventilación, se realizó el cálculo de caudal aire, así como el procesamiento de todos los datos obtenidos en campo de cada estación de ventilación y la posterior evaluación del sistema. Además, los valores de caudal de aire medidos en campo se compararon con los valores de caudal de aire teóricos obtenidos del modelo en Ventsim, con el objetivo de determinar la variación del funcionamiento del sistema de ventilación de acuerdo a lo diseñado en el software Ventsim.

3.7. GEOLOGÍA

La mena en el distrito minero de Yanacocha está alojada dentro de las secuencias piroclásticas superiores y andesíticas inferiores pertenecientes al Complejo Volcánico Yanacocha (11-12.5 Ma). La mineralización de alta ley de oro en Yanacocha ocurrió dentro de zonas permeables desarrolladas durante estados tempranos de alteración tipo “Alta Sulfuración”, zonas de fallas, y en brechas tanto hidrotermales como freáticas. La mineralización ocurre de modo posterior a erupciones freáticas en múltiples fases, y está relacionada local y espacialmente con emplazamientos de diatremas y diques de textura porfírica ricos en feldespatos que son asociados con la fase de resurgimiento tardío de complejos de domos de flujos de andesita y latita. (Vilela, 2014).

El yacimiento Chaquicocha pertenece al sistema epitermal del tipo ácido-sulfato que domina el distrito, controlado por diferentes eventos hidrotermales que han generado horizontes síliceos en diferentes niveles, debido a las variaciones de los niveles de ebullición así como de las napas freáticas que han ido formando brechamientos por explosiones sucesivas (brechas freáticas, freatomagmáticas), con dominio de vapores en las partes altas, donde la lixiviación ácida ha generado porosidad la cual asociada al fracturamiento, han favorecido la formación del horizonte de óxidos de hierro con contenido de oro. Existe un zonamiento general de sílice masiva en el centro del depósito que gradúa externamente a sílice vuggy y finalmente a sílice granular. Fuera de las rocas de lixiviación ácida están las zonas de sílice-alunita, sílice clay y clay-pirita correspondiendo las dos primeras a la alteración argílica avanzada y la última a la argílica. La mineralización de oro de forma libre y diseminada en oquedades y microfracturas se

encuentra mejor distribuida en rocas de alteración silíceá, en contacto con óxidos de hierro, jarosita y barita en la zona de óxidos y en la zona de transición y sulfuros de forma libre. (Zamora, 2005).

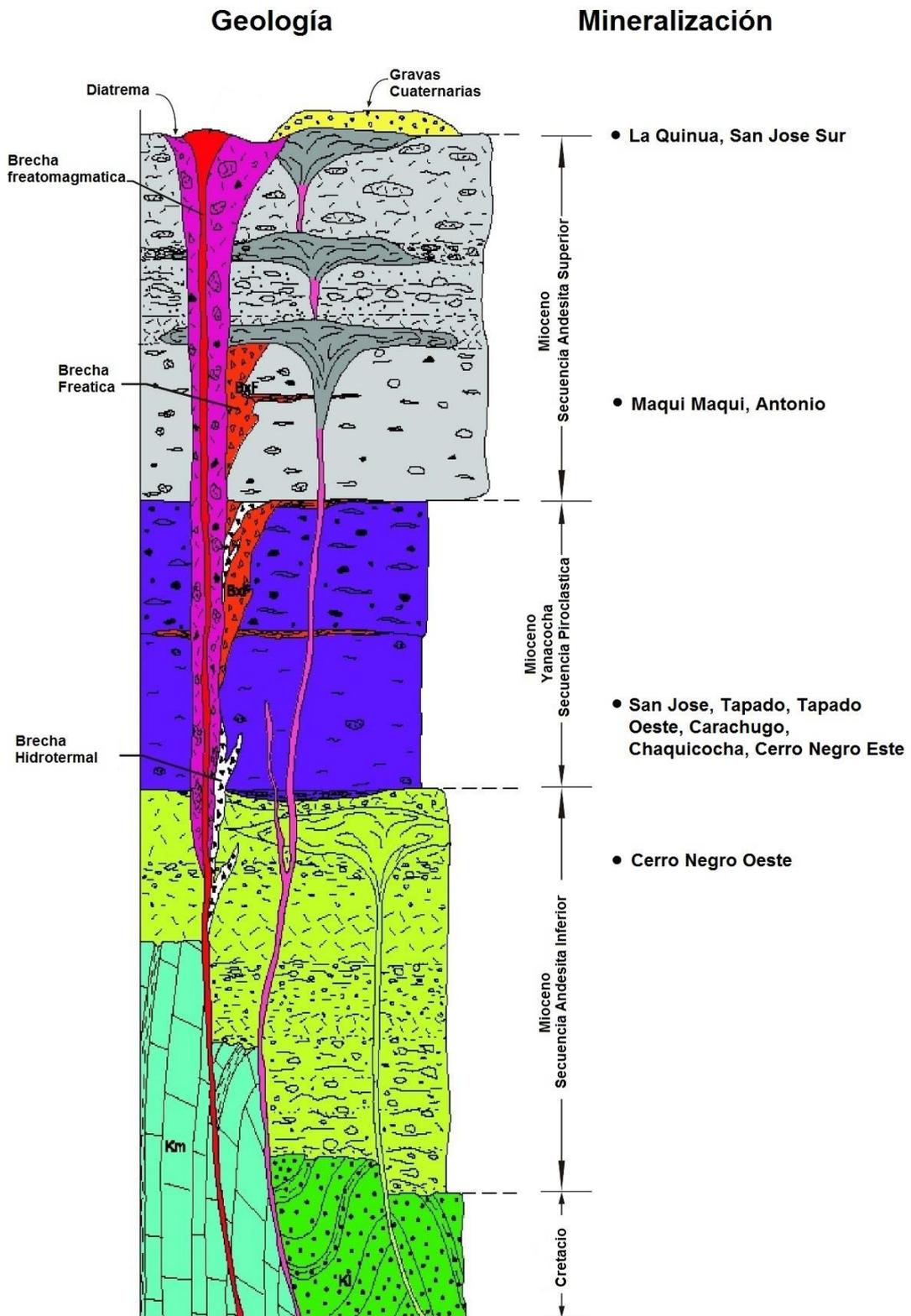


Figura 13. Columna estratigráfica de Minera Yanacocha. (Vilela, 2014).

3.8. GENERALIDADES DEL PROYECTO

3.8.1. Túnel de Exploración Chaquicocha

El Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, tiene un desarrollo total de 817 m lineales de labores subterráneas, con el objetivo de proveer cámaras de perforación (Cruceos de perforación) para poder determinar el potencial minero existente mediante perforaciones diamantinas direccionadas hacia el cuerpo mineralizado.

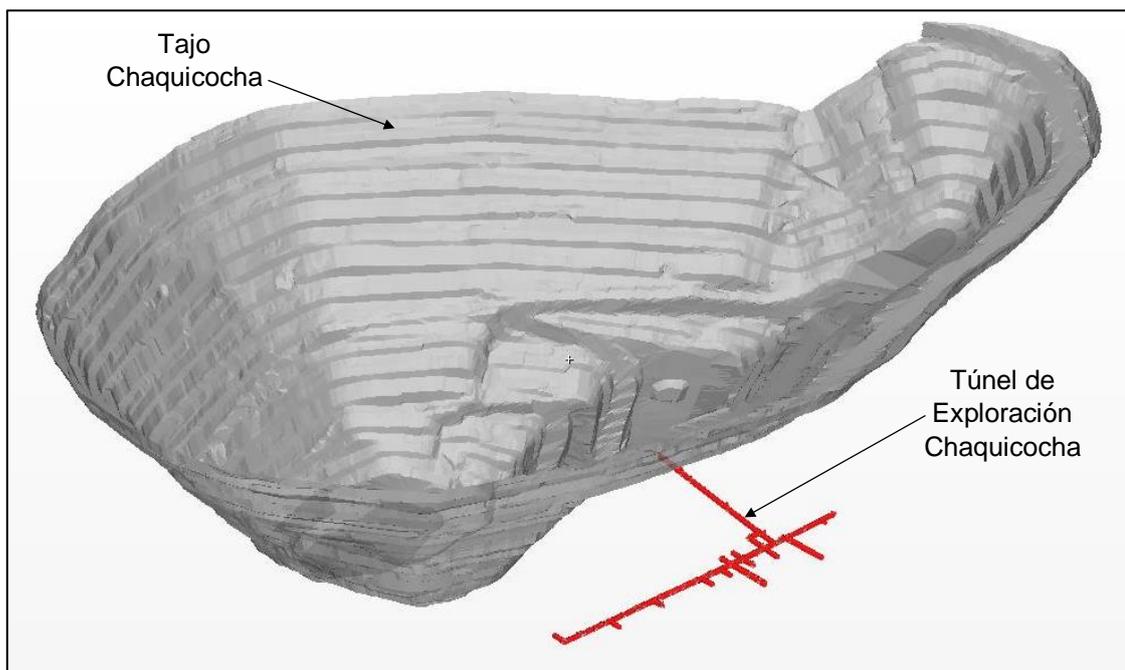


Figura 14. Isométrico del Túnel de Exploración Chaquicocha en Ventsim.

3.8.2. Componentes

a) Facilidades superficiales

Las facilidades superficiales son el conjunto de infraestructura que permiten dar el soporte durante la ejecución de las labores subterráneas del Túnel de Exploración Chaquicocha y están ubicadas en la plataforma 3750. Como parte de facilidades superficiales se tiene: Taller de mantenimiento, oficinas tipo contenedores, comedor, almacén abierto para materiales, casa fuerza, sedimentador, entre otros. Esta infraestructura se muestra en la foto 1.



Foto 1. Facilidades superficiales en la Plataforma 3750.

b) Falso túnel

El falso túnel tiene por finalidad asegurar permanentemente el ingreso hacia las labores subterráneas, en el Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750 el falso túnel tiene una longitud de 7 m, que se determinó mediante una simulación de caída de rocas (Rock Fall Analysis), el cual incorpora barreras Jersey en la cresta del talud, lo cual permite la contención de rocas o material suelto antes de que pueda llegar a impactar en el falso túnel.

El falso túnel fue construido a base de concreto armado en toda su longitud y luego recubierto con material detrítico.

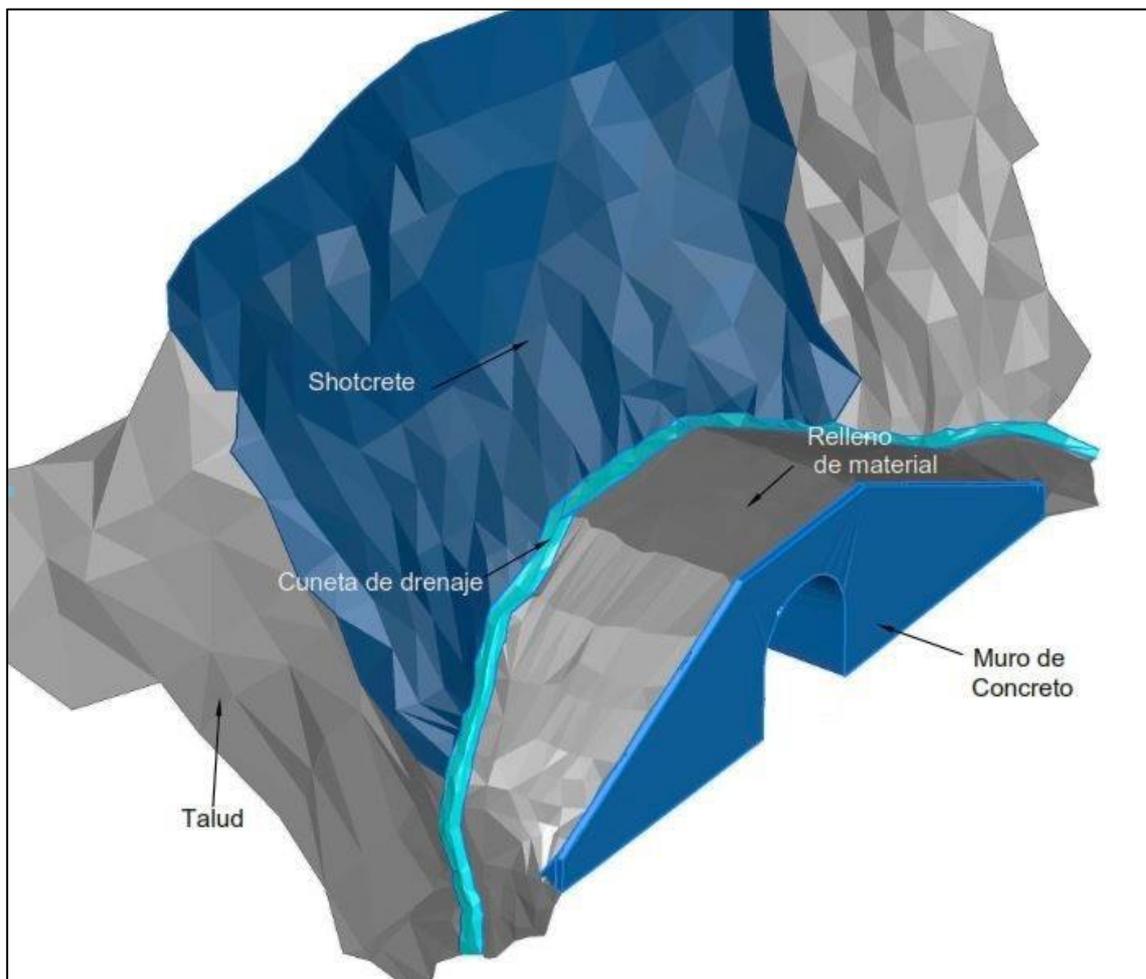


Figura 15. Isométrico del falso túnel en AutoCAD.

c) Portal y Drift

El portal comprende la excavación de los primeros 8 m de la rampa principal de ingreso, reforzada con cimbras metálicas y plancha acanalada; con la finalidad de asegurar la estabilidad del macizo rocoso en los primeros metros, debido a que el terreno se encontraba influenciado por los trabajos anteriores del minado superficial en el Tajo Chaquicocha.

Por otro lado el Drift comprende el desarrollo de los siguientes 809 m lineales de laboreo subterráneo (entre rampas, cruceros, sumideros y refugios para peatones), en la foto 2 se muestra el Portal y el Drift.



Foto 2. Portal & Drift.

Para el Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, se emplearon secciones en arco de 5.0 m Ancho x 5.5m Alto para labores principales, secciones de 5.0 m Ancho x 5.0 m Alto para labores secundarias y secciones cuadradas de 3.0 m Ancho x 3.0 m Alto para refugios de peatones.

3.8.3. Proceso operativo en los frentes de desarrollo

El proceso operativo en los frentes de desarrollo del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, consiste en:

- **Marcado de malla de perforación:** de los frentes con el apoyo de una estación total Leica TS 09.
- **Perforación del frente:** utilizando un Jumbo electrohidráulico Sandvik DD 321 de dos brazos con un sistema de perforación semi-húmedo.



Foto 3. Perforación del frente con Jumbo Sandvik DD 321.

- **Carguío con explosivos:** se emplea emulsión encartuchada y el carguío se realiza de forma manual.
- **Voladura:** se utilizan detonadores electrónicos para realizar una voladura remota a distancia.
- **Ventilación:** para poder disipar los gases producidos por la voladura.

- **Monitoreo de gases y regado de carga:** para verificar las condiciones de la atmosfera de mina con apoyo de un detector multigas portátil IBRID MX6 y el posterior regado de carga para evitar la polución y detectar cualquier anomalía posterior a la voladura.
- **Limpieza del frente:** con apoyo de un Scooptram Sandvik LH410.
- **Desatado de rocas con equipo mecanizado:** utilizando un Scaler Normet Scamec 2000.



Foto 4. Desatado de rocas con equipo mecanizado Scaler Normet Scamec 2000.

- **Sostenimiento mecanizado:** se realiza el sostenimiento de acuerdo a las condiciones del terreno. Para la colocación de pernos Split set y malla electrosoldada se utiliza un Jumbo empernador Sandvik DS311.



Foto 5. Sostenimiento mecanizado con Bolter Sandvik DS311.

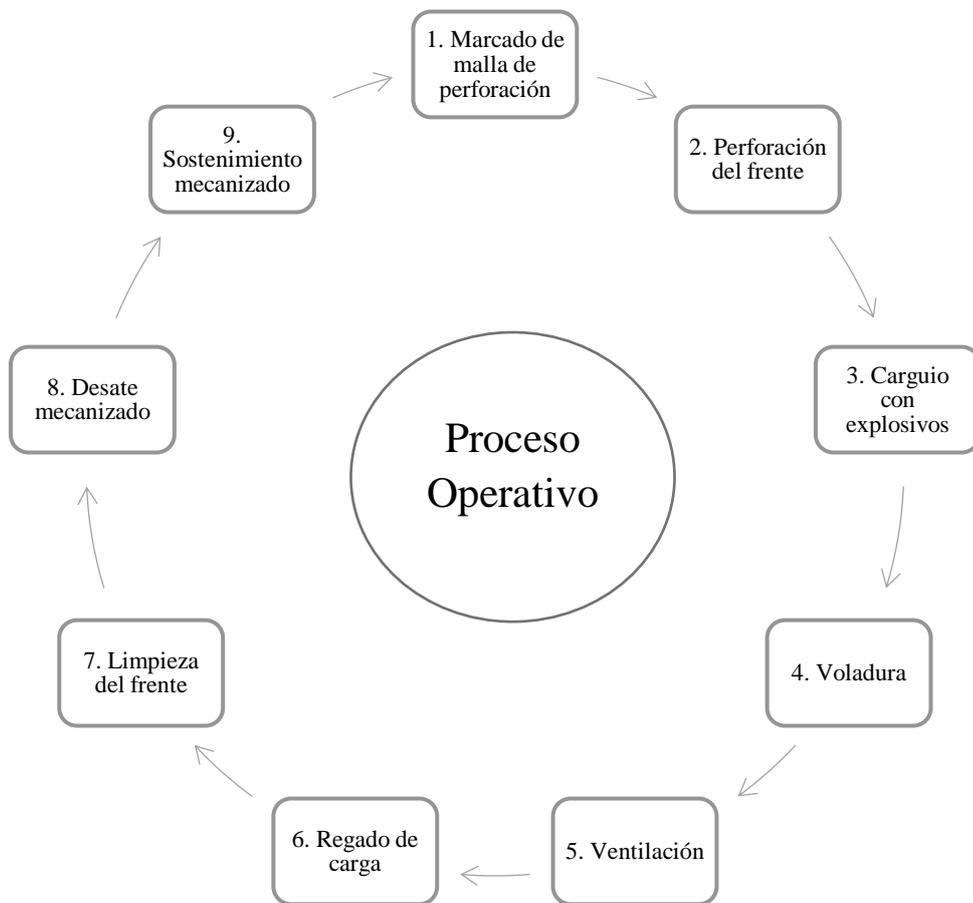


Figura 16. Proceso operativo del Túnel de Exploración Chaquicocha.

3.9. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN INICIAL

3.9.1. Descripción del sistema de ventilación

El Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750 cuenta un sistema de ventilación impelente, que utiliza 02 ventiladores inyectores de aire fresco de 30 000 CFM y 75 HP, instalados en paralelo sobre contenedores, a una distancia de 20 m del acceso al túnel, para así forzar el ingreso de aire fresco hacia el tope de las labores mediante ductos flexibles de ventilación de 42 pulgadas de diámetro.

Con este sistema de ventilación se realizaron 230 m de avance, que comprende el desarrollo de la Rampa negativa 3750 y parte de la Galerías 179 NW y 179 SE entre otros cruceros.



Foto 6. Ventiladores del 30 000 CFM instalados sobre contenedores.

3.9.2. Requerimientos de caudal aire

Los requerimientos de caudal de aire fueron calculados de acuerdo al ANEXO 38 del DS-024-2016-EM del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería así como su modificatoria según el DS-023-2017-EM.

Para determinar los requerimientos de aire del Túnel de Exploración Chaquicocha, solo fueron considerados los cálculos de: Caudal de aire requerido por el número de trabajadores, caudal de aire por equipos con motor petrolero y caudal requerido por fugas.

Mientras que los cálculos de: Caudal requerido por el consumo de madera y caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo, fueron omitidos debido a que no aplica para la población de estudio, ya que no se utilizó madera como elemento de sostenimiento y la temperatura en el nivel 3750 (único nivel) en todas las mediciones realizadas se encontraban por debajo de los 24° C.

a) Caudal requerido por el número de trabajadores

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

Entonces:

$F = 5 \text{ m}^3\text{/min}$ (El Túnel de Exploración Chaquicocha se encuentra a una elevación de 3750 m.s.n.m. y el DS-024-2016-EM establece que de 3000 a 4000 msnm, la cantidad mínima de aire necesario por hombre será igual a 5 m³/min)

$N = 15$ (Distribuidos entre personal de Minera Yanacocha y de la empresa contratista)

$$Q_{Tr} = 5 \times 15 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 75 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 2\ 649 \text{ CFM}$$

b) Caudal requerido por equipo con motor petrolero

$$Q_{Eq} = 3 \times \text{HP} \times D_m \times F_u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Tabla 6. Potencia efectiva de equipos petroleros utilizados inicialmente.

Item	Cantidad	HP	Factor de utilización	Disponibilidad Mecánica	HP efectivos
Scoop Sandvik LH410	1	295	0.41	0.92	111.3
Jumbo Sandvik DD321	1	181	0.24	0.93	40.4
Bolter Sandvik DS311	1	94	0.20	0.91	17.1
Scaler Norment Scamec 2000	1	228	0.19	0.92	39.9
Normet Semmco Alpha 30	1	168	0.23	0.92	35.5
Autohormigonera Carmix 3.5 TT	1	111	0.24	0.94	25.0
Telehandler Cat TL642D	1	100	0.38	0.91	34.6
Total					303.8

$$Q_{Eq} = 3 \times 303.8 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Eq} = 911.4 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Eq} = 32\,186 \text{ CFM}$$

c) Caudal requerido por fugas

$$Q_{Fu} = 15\% \times (Q_{Tr} + Q_{Te} + Q_{Ma} + Q_{Eq}) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Fu} = 15\% \times (75 + 0 + 0 + 911.4) \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Fu} = 148 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Fu} = 5\,225 \text{ CFM}$$

d) Caudal total

El resumen del caudal total de aire requerido se detalla en la tabla 7.

Tabla 7. Requerimiento total de aire para el sistema de ventilación inicial.

Item	Caudal	
	m ³ /min	CFM
Caudal por el número de trabajadores	75	2,649
Caudal por equipos con motor petrolero	911	32,186
Caudal por fugas	148	5,225
Caudal requerido	1,134	40,060

3.9.3. Medición de caudal de aire

Se realizaron 02 mediciones de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa en 04 estaciones de ventilación con la finalidad de obtener datos representativos del sistema de ventilación, para lo cual se utilizó un anemómetro Testo 480 para realizar las mediciones de velocidad de aire; y un anemómetro Kestrel 5200 para obtener datos de temperatura y humedad relativa.

Las mediciones de aire se realizaron utilizando el método de barrido, haciendo circular el anemómetro por toda la sección de la estación de ventilación, efectuando un barrido lo más amplio y completo posible, la cual se representa en la figura 17.

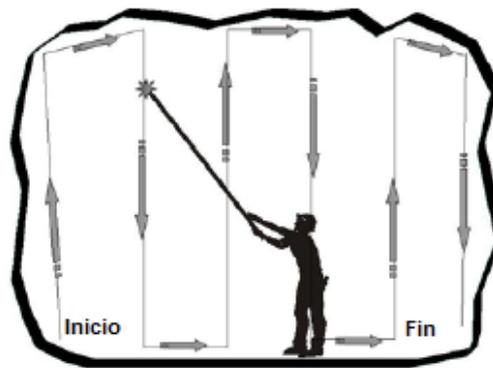


Figura 17. Método del barrido. (Zitrón, 2010).

En cada estación de ventilación, se tomaron 03 valores de velocidad de aire para poder determinar una velocidad promedio; además se realizó el levantamiento topográfico de las secciones transversales de cada estación de ventilación. El área real de las estaciones de ventilación para temas de cálculos, viene a estar dada por la resta del área de la sección transversal de la estación de ventilación menos el área circular del conducto de ventilación. Con los datos de la velocidad de aire promedio y el área de la estación de ventilación, se calculó el caudal de aire en cada una de las estaciones de ventilación. La primera estación de ventilación fue ubicada a 49.5 m desde la bocamina, en una zona que presenta poca sobrerotura, la segunda estación fue ubicada a 80 m con respecto a la primera estación de ventilación debido a que se encuentran en la misma labor subterránea y en un tramo recto, para las estaciones que se encuentra en las galerías SE y SW se ubicaron a 20 m detrás del tramo final de la manga de ventilación, con la finalidad de que la turbulencia generada en el frente no afecte las mediciones de velocidad de aire.

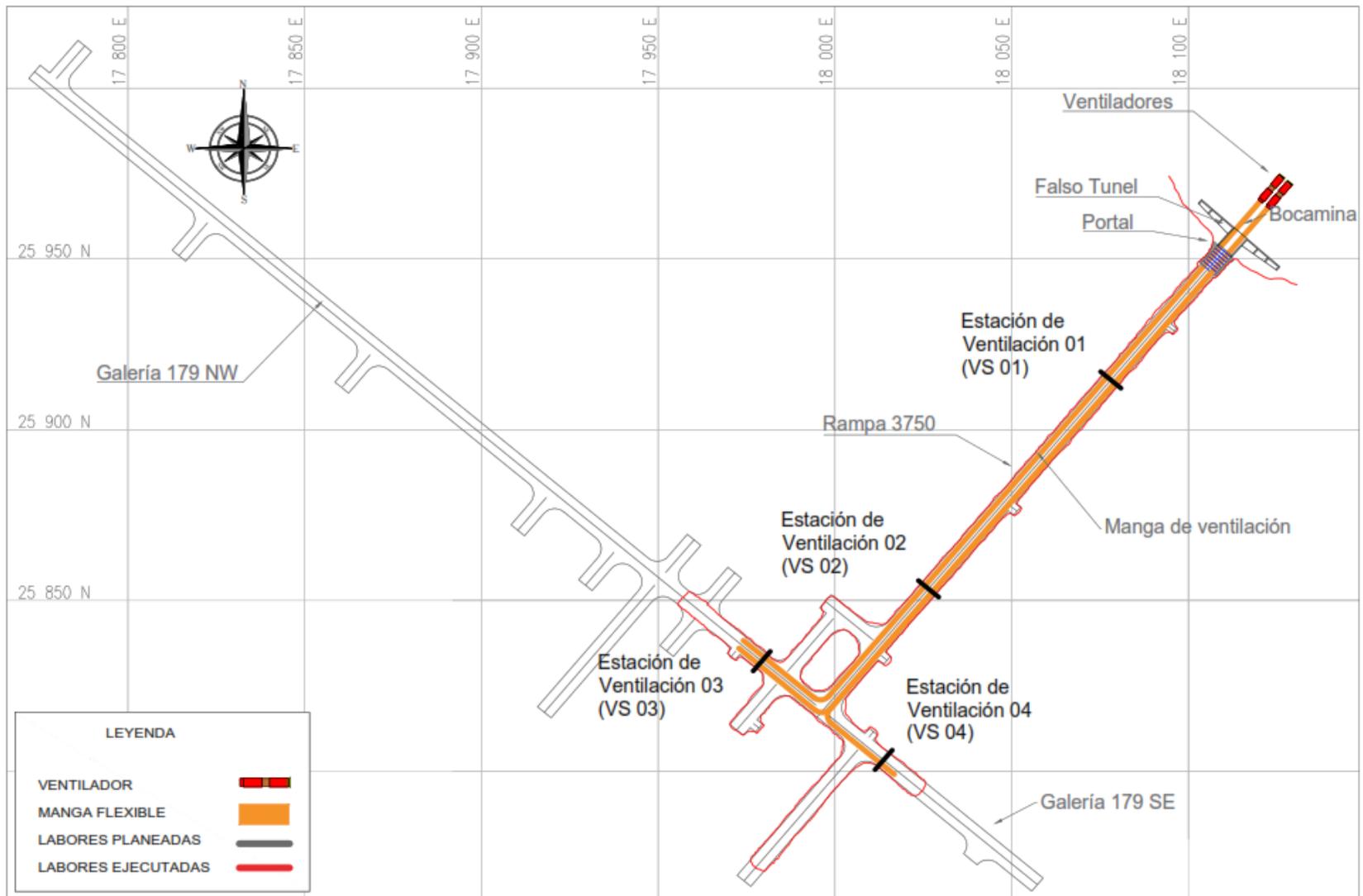


Figura 18. Estaciones de ventilación del sistema de ventilación inicial en AutoCAD.

a) **Medición 01:** Se consideraron 04 estaciones de ventilación definidas estratégicamente, para cada estación se tomaron datos de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa mediante la utilización de anemómetros; el área fue determinada mediante un levantamiento topográfico. Los datos de la medición 01 y el cálculo de los caudales de aire en cada estación de ventilación se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Medición 01 del sistema de ventilación inicial.

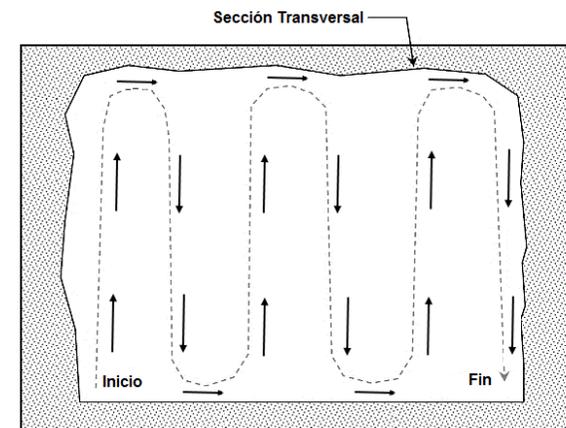
Labor	Estación	Área (m ²)	Velocidad (m/seg)				Caudal CFM	T °C	Hum Rel. %
			V1	V2	V3	V. Prom			
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	27.10	0.89	0.87	0.90	0.89	50,914	16.5	73.0
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.93	0.95	0.98	0.96	0.96	48,846	16.3	72.2
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 03	25.34	0.71	0.69	0.72	0.71	37,943	16.2	72.3
GA 179 SE (PK 0+020)	VS 04	27.84	0.61	0.63	0.59	0.61	35,984	16.3	72.4

Equipos utilizados

Anemómetro Testo 480

Anemómetro Kestrel 5200

Estación total Leica TS 09



b) Medición 02: Se consideraron 04 estaciones de ventilación definidas estratégicamente, para cada estación se tomaron datos de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa mediante la utilización de anemómetros; el área fue determinada mediante un levantamiento topográfico. Los datos de la medición 02 y el cálculo de los caudales de aire en cada estación de ventilación se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Medición 02 del sistema de ventilación inicial.

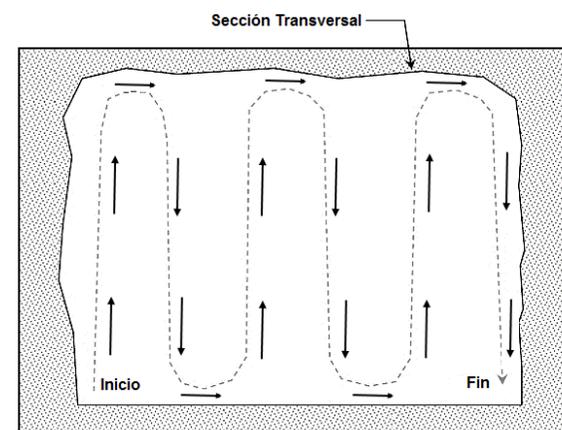
Labor	Estación	Área (m ²)	Velocidad (m/seg)				Caudal CFM	T °C	Hum Rel. %
			V1	V2	V3	V. Prom			
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	27.10	0.88	0.91	0.90	0.90	51,488	16.1	72.0
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.93	0.97	0.96	0.98	0.97	49,184	16.0	73.9
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 03	25.34	0.69	0.72	0.73	0.71	38,301	16.3	72.4
GA 179 SE (PK 0+020)	VS 04	27.84	0.62	0.64	0.58	0.61	36,180	16.3	72.6

Equipos utilizados

Anemómetro Testo 480

Anemómetro Kestrel 5200

Estación total Leica TS 09



3.9.4. Análisis de las mediciones de caudal de aire

De las 02 mediciones realizadas se calculó el caudal de aire promedio en cada estación de ventilación y se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Caudal de aire promedio del sistema de ventilación inicial.

Labor	Estación	Área (m ²)	V. Promedio (m/seg)	Caudal CFM
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	27.10	0.89	51,201
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.93	0.97	49,015
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 03	25.34	0.71	38,122
GA 179 SE (PK 0+020)	VS 04	27.84	0.61	36,082

La cobertura de caudal de aire del sistema de ventilación está dada por la relación que existe entre el caudal de aire medido y el caudal de aire requerido, expresado en porcentaje. Esta cobertura se determina considerando aquel caudal de aire medido lo más próximo al frente de desarrollo y que presenta un menor valor, debido a que el sistema de ventilación debe cumplir con las necesidades de caudal de aire requerido en todas las labores subterráneas del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, las cuales fueron calculadas de acuerdo al ANEXO 38 del DS-024-2016-EM y su modificatoria según el DS-023-2017-EM. Para determinar la cobertura de caudal de aire del sistema de ventilación se consideró el caudal medido en la estación VS 04, la cual se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Cobertura de aire del sistema de ventilación inicial.

Item	Caudal (CFM)
Caudal de aire requerido	40,060
Caudal de aire medido	36,082
Cobertura	90%

De acuerdo al análisis del sistema de ventilación inicial, se tiene que el caudal de aire suministrado por el sistema no cumple con los requerimientos de ventilación; ya que tiene una cobertura de caudal de aire del 90%, lo cual dificulta el desarrollo del proyecto.

3.10. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

3.10.1. Marco de referencia

De acuerdo con la evaluación del sistema de ventilación inicial, se determinó que el sistema no cumple con los requerimientos de caudal de aire, por tal motivo es necesario buscar una optimización del sistema de ventilación inicial, teniendo en cuentas las siguientes consideraciones en función al avance que se tiene:

- Es necesario la incorporación de un volquete, ya que el scooptram no debe tener un recorrido mayor de 200 m con el material producido por la voladura durante la limpieza de los frentes de desarrollo; por tal motivo el material será trasladado hacia cámaras de almacenamiento provisional y posteriormente será transportado hacia superficie mediante un volquete.
- Se necesita la incorporación de una autohormigonera adicional, debido a que se presentan deficiencias en la etapa de lanzado de shotcrete por demoras en la preparación y abastecimiento al robot lanzador de concreto Alpha 30.
- Se tiene la necesidad de incorporar dos camionetas, una para transportar explosivos y la otra para transportar accesorios de voladura, hacia los frentes de carguío de explosivos, las cuales deben estar debidamente acondicionadas para tal fin.

Debido a lo descrito se debe considerar la incorporación de 01 volquete, 01 autohormigonera y 02 camionetas, los cuales están dentro de la categoría de equipos con motor petrolero, por lo que se debe realizar un nuevo cálculo de requerimiento de aire para poder dimensionar correctamente los ventiladores.

3.10.2. Consideraciones del diseño

La Asesoría de Ventilación de Newmont, recomendó la utilización de un sistema de ventilación aspirante con apoyo impelente, esto debido a la eficiencia del sistema en otras operaciones de Newmont y porque ofrece una ventilación más limpia, diluyendo con

mayor efectividad y rapidez los gases producidos por las voladuras y mejorando las condiciones de confort de los trabajadores.

De acuerdo al diseño final del Túnel de Exploración Chaquicocha, la Asesoría de Ventilación de Newmont determinó que para el diseño de la optimización del sistema de ventilación es necesario la implementación de 01 ventilador principal aspirante y 03 ventiladores auxiliares impelentes que servirán como apoyo del sistema principal y se ubicaran en las labores de mayor longitud para asegurar un flujo de aire en cantidad y calidad suficientes.

Para el sistema principal de ventilación se recomendó la utilización de ductos metálicos debido a la gran resistencia que presentan durante la instalación y ante las ondas expansivas producidas por la voladura; mientras que para la ventilación auxiliar se recomendó la utilización de manga de ventilación flexible.

La propuesta de optimización del sistema de ventilación se presenta en la figura 19.

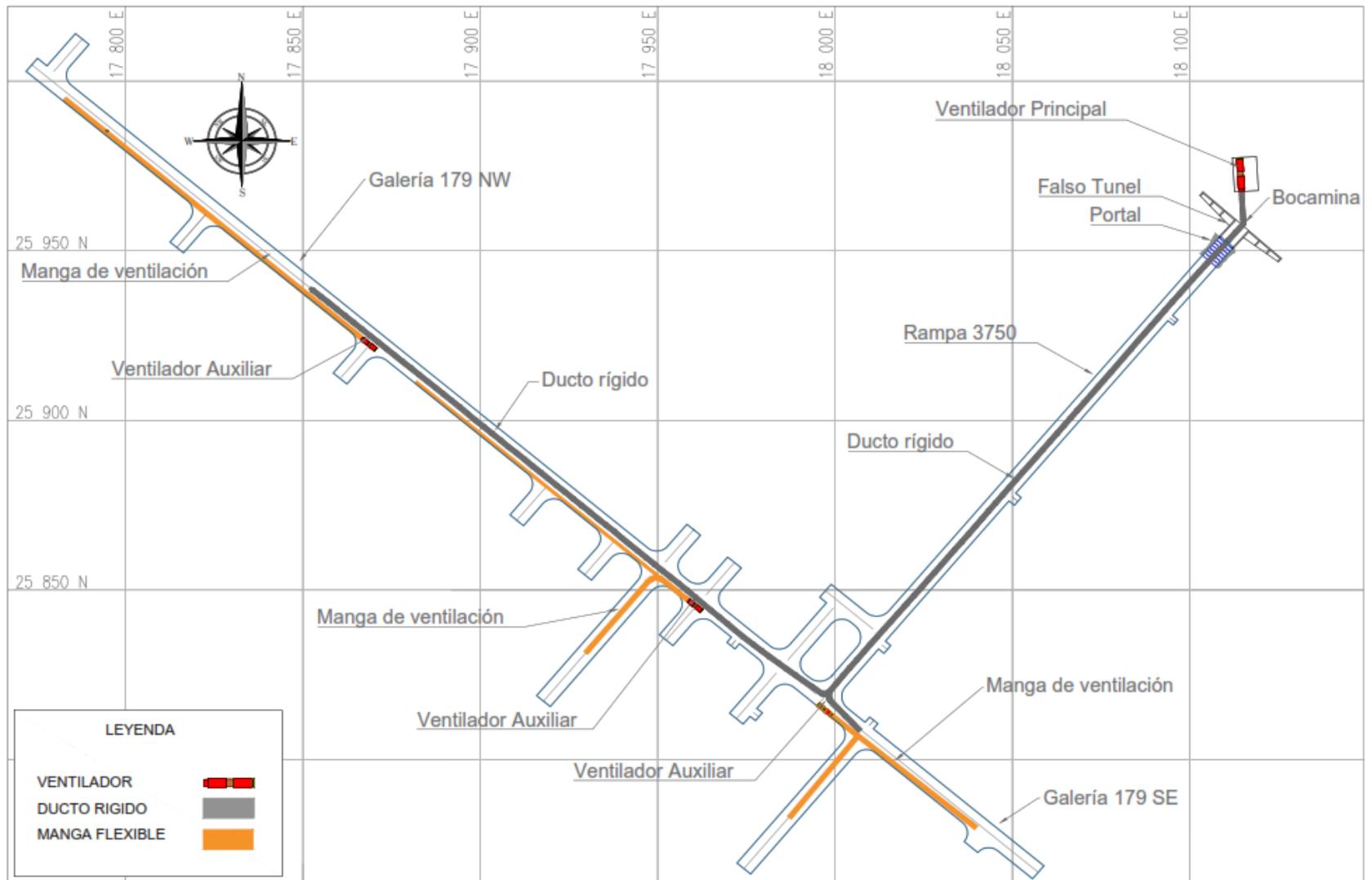


Figura 19. Propuesta de optimización del sistema de ventilación en AutoCAD.

3.10.3. Dimensionamiento de los ventiladores

Para poder dimensionar el caudal de aire que suministrará el ventilador principal y los ventiladores auxiliares, se debe determinar los requerimientos de aire de acuerdo a lo establecido en el ANEXO 38 del DS-024-2016-EM y su modificatoria según el DS-023-2017-EM.

A) Ventilador principal

El dimensionamiento de caudal de aire para el ventilador principal se determinó considerando los siguientes ítems:

a) Caudal requerido por el número de trabajadores

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

Entonces:

$F = 5 \text{ m}^3\text{/min}$ (El Túnel de Exploración Chaquicocha se encuentra a una elevación de 3750 m.s.n.m. y el DS-024-2016-EM establece que de 3000 a 4000 msnm, la cantidad mínima de aire necesario por hombre será igual a 5 m³/min)

$N = 15$ (Distribuidos entre personal de Minera Yanacocha y de la empresa contratista)

$$Q_{Tr} = 5 \times 15 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 75 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 2\,649 \text{ CFM}$$

b) Caudal requerido por equipo con motor petrolero

$$Q_{Eq} = 3 \times \text{HP} \times D_m \times F_u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Tabla 12. Potencia efectiva de equipos petroleros (ventilador principal).

Item	Cantidad	HP	Factor de utilización	Disponibilidad Mecánica	HP efectivos
Scoop Sandvik LH410	1	295	0.41	0.92	111.3
Jumbo Sandvik DD321	1	181	0.24	0.93	40.4
Bolter Sandvik DS311	1	94	0.20	0.91	17.1
Scaler Norment Scamec 2000	1	228	0.19	0.92	39.9
Normet Semmco Alpha 30	1	168	0.23	0.92	35.5
Autohormigonera Carmix 3.5 TT	2	111	0.24	0.94	50.1
Telehandler Cat TL642D	1	100	0.38	0.91	34.6
Volquete Mercedes Benz	1	429	0.37	0.95	150.8
Camioneta Toyota Hilux	2	220	0.37	0.96	156.3
Total					635.9

$$Q_{Eq} = 3 \times 635.9 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Eq} = 1\ 907.7 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Eq} = 67\ 373 \text{ CFM}$$

c) Caudal requerido por fugas

$$Q_{Fu} = 15\% \times (Q_{Tr} + Q_{Te} + Q_{Ma} + Q_{Eq}) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Fu} = 15\% \times (75 + 0 + 0 + 1\ 907.7) \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Fu} = 297.4 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{Fu} = 10\ 503 \text{ CFM}$$

d) Caudal total

El caudal total de aire que debe suministrar el ventilador principal, se detalla en la tabla 13.

Tabla 13. Requerimiento de aire para el ventilador principal.

Item	Caudal	
	m ³ /min	CFM
Caudal por el número de trabajadores	75	2,649
Caudal por equipos con motor petrolero	1,908	67,373
Caudal por fugas	297	10,503
Caudal requerido	2,280	80,525
Caudal adicional (30% caudal requerido)	684	24,157
Caudal total	2,964	104,682

Se consideró que la capacidad del ventilador debe tener un 30% adicional del caudal de aire total requerido, por cuestiones de planes a futuro e imprevistos. Para temas de cálculos se consideró un caudal de aire de 105 000 CFM.

B) Ventiladores auxiliares

Para el dimensionamiento de ventiladores auxiliares se consideró menor cantidad de personal y equipos mineros en los frentes de las labores subterráneas.

a) Caudal requerido por el número de trabajadores

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

Entonces:

$F = 5 \text{ m}^3\text{/min}$ (El Túnel de Exploración Chaquicocha se encuentra a una elevación de 3750 m.s.n.m. y el DS-024-2016-EM establece que de 3000 a 4000 msnm, la cantidad mínima de aire necesario por hombre será igual a 5 m³/min)

$N = 6$ (Distribuidos entre personal de Minera Yanacocha y de la empresa contratista)

$$Q_{Tr} = 5 \times 6 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 30 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Tr} = 1\ 059 \text{ CFM}$$

b) Caudal requerido por equipo con motor petrolero

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times D_m \times F_u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Tabla 14. Potencia efectiva de equipos petroleros (Ventilador auxiliar).

Item	Cantidad	HP	Factor de utilización	Disponibilidad Mecánica	HP efectivos
Scoop Sandvik LH410	1	295	0.41	0.92	111.3
Jumbo Sandvik DD321	1	181	0.24	0.93	40.4
Bolter Sandvik DS311	1	94	0.20	0.91	17.1
Scaler Norment Scamec 2000	1	228	0.19	0.92	39.9
Norment Semmco Alpha 30	1	168	0.23	0.92	35.5
Autohornigonera Carmix 3.5 TT	1	111	0.24	0.94	25.0
Telehandler Cat TL642D	1	100	0.38	0.91	34.6
Total					303.8

$$Q_{Eq} = 3 \times 303.8 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Eq} = 911.4 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Eq} = 32\,186 \text{ CFM}$$

c) Caudal requerido por fugas

$$Q_{Fu} = 15\% \times (Q_{Tr} + Q_{Te} + Q_{Ma} + Q_{Eq}) \text{ (m}^3\text{/min)}$$

$$Q_{Fu} = 15\% \times (30 + 0 + 0 + 911.4) \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Fu} = 141.2 \text{ m}^3\text{/min}$$

$$Q_{Fu} = 4\,987 \text{ CFM}$$

d) Caudal total

El caudal de aire total que deben suministrar los ventiladores auxiliares, se detalla en la tabla 15.

Tabla 15. Requerimiento total de aire para los ventiladores auxiliares.

Item	Caudal	
	m ³ /min	CFM
Caudal por el número de trabajadores	30	1,059
Caudal por equipos con motor petrolero	911	32,186
Caudal por fugas	141	4,987
Caudal requerido	1,083	38,233
Caudal adicional (30% caudal requerido)	325	11,470
Caudal total	1,407	49,702

Se consideró que la capacidad del ventilador debe tener un 30% adicional del caudal de aire total requerido, debido a cuestiones de planes a futuro e imprevistos. Para temas de cálculos se consideró un caudal de aire de 50 000 CFM.

3.10.4. Características de los ventiladores utilizando Ventsim

A partir de la propuesta de optimización del sistema de ventilación se determinaron las ubicaciones finales del ventilador principal y de los ventiladores auxiliares, así como el dimensionamiento de los caudales de aire, los cuales se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Características y ubicación de los ventiladores.

Equipo	Tipo	Ubicación	Caudal (CFM)
Ventilador Principal	Aspirante	Superficie	105,000
Ventilador Auxiliar 01	Impelente	GA 179 SE (PK 0+002.5)	50,000
Ventilador Auxiliar 02	Impelente	GA 179 NW (PK 0+042.5)	50,000
Ventilador Auxiliar 03	Impelente	GA 179 NW (PK 0+162.5)	50,000

Para determinar las características de potencia y presión que deben tener los ventiladores, se realizó la simulación del diseño del circuito de ventilación en el software Ventsim con los valores de caudal de aire calculados teóricamente para el ventilador principal y para los ventiladores auxiliares; la simulación realizada incorporó todos los datos necesarios y con valores reales, para así poder lograr una simulación correcta, y lo más cercana a la realidad posible.

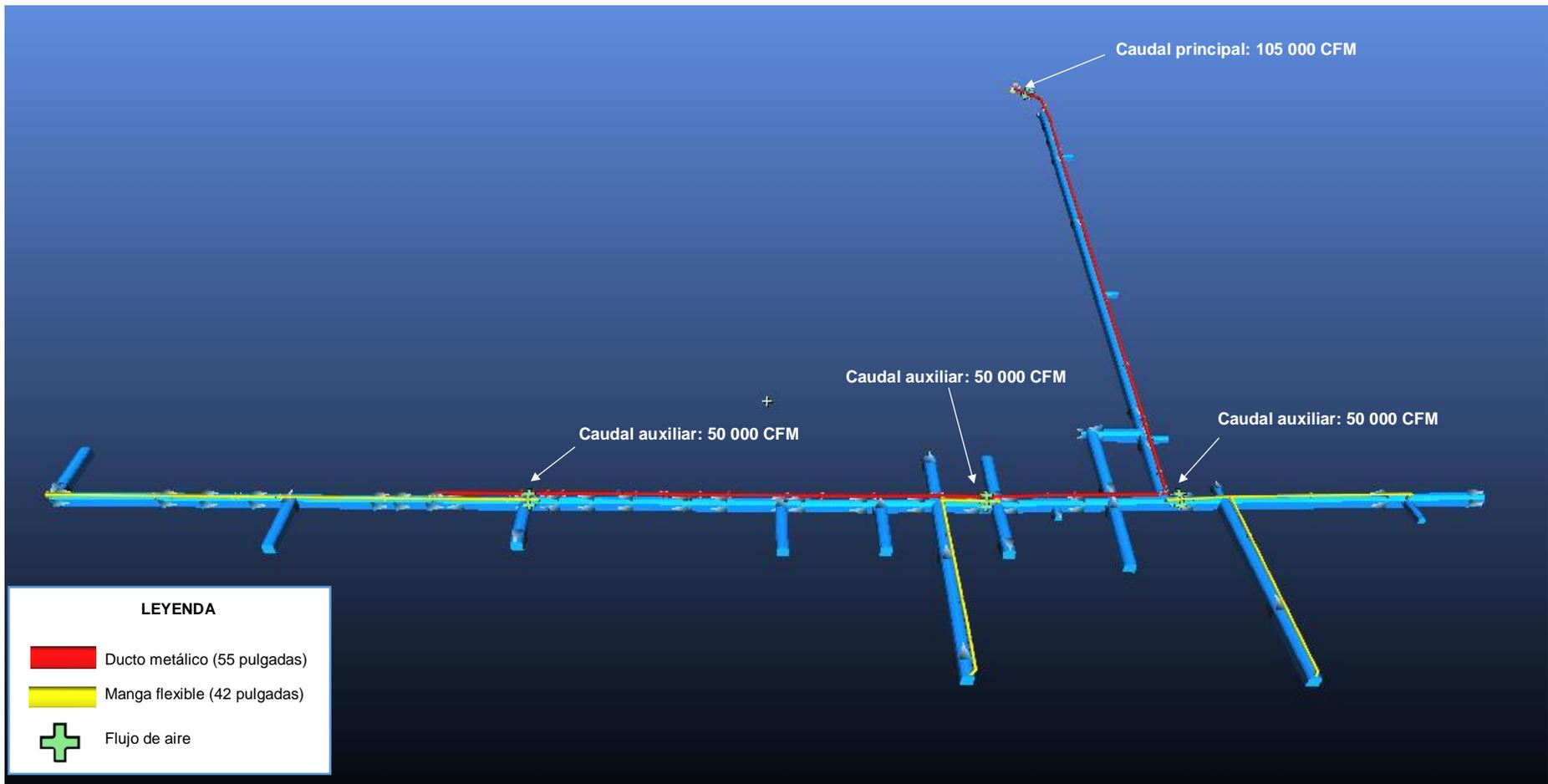


Figura 20. Simulación del sistema de ventilación.

a) Ventilador principal

De acuerdo a la simulación en el software Ventsim, para el ventilador principal se tiene:

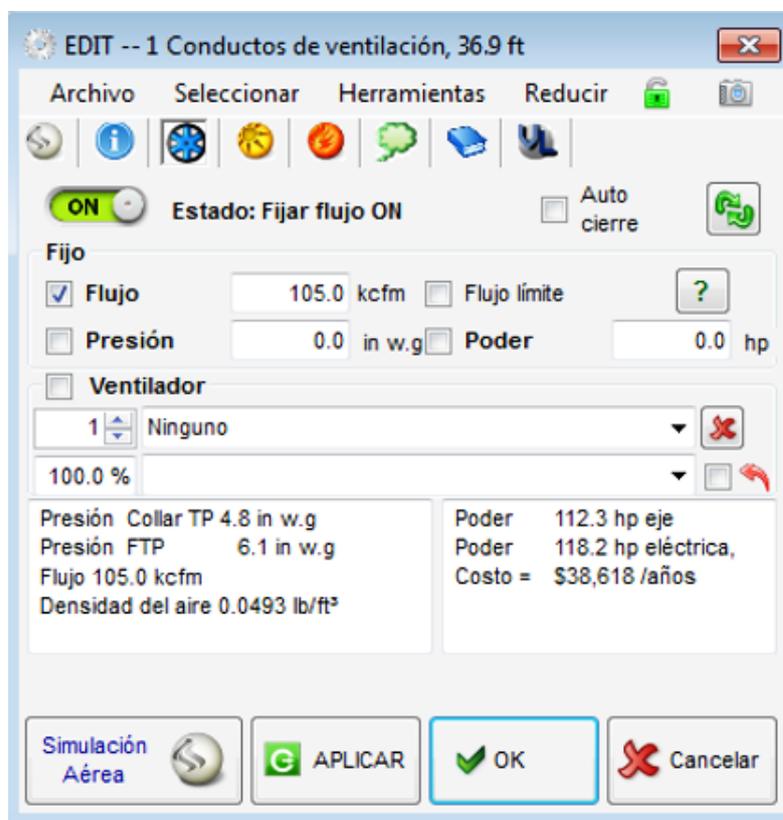


Figura 21. Características del ventilador principal utilizando Ventsim.

De acuerdo a la figura 21, las características que debe tener el ventilador principal se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Características del ventilador principal utilizando Ventsim.

Item	Unidad	Valor
Caudal	CFM	105,000
Presión Total	Pulg. de H2O	6.1
Potencia	Hp	118

a) Ventiladores auxiliares

De acuerdo a la simulación en el software VentSim, para los ventiladores auxiliares se tiene:

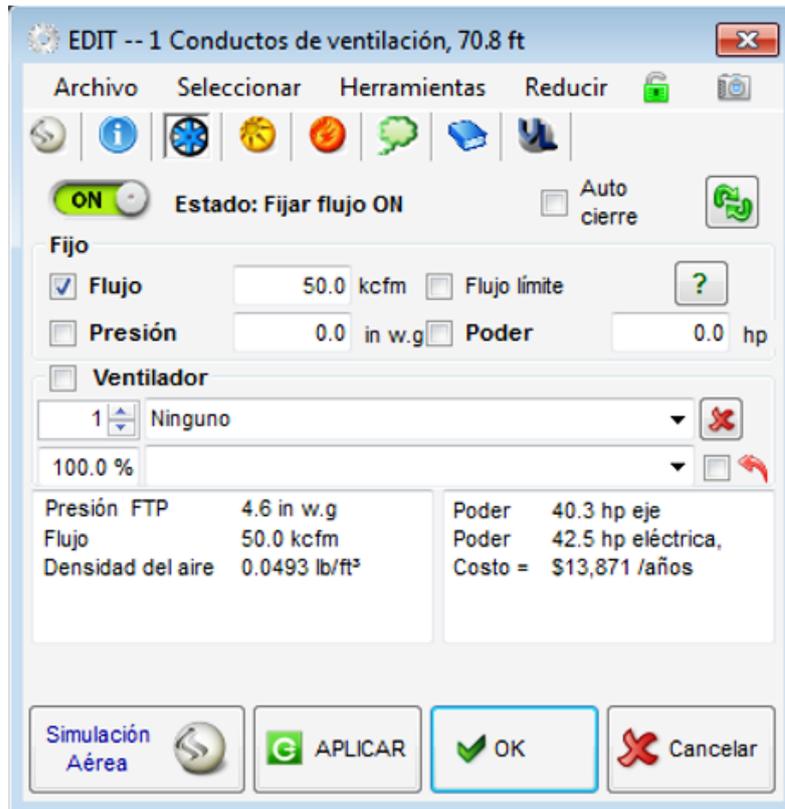


Figura 22. Características de los ventiladores auxiliares utilizando Ventsim.

De acuerdo a la figura 22, las características que deben tener los ventiladores auxiliares se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Características de los ventiladores auxiliares utilizando Ventsim.

Item	Unidad	Valor
Caudal	CFM	50,000
Presión Total	Pulg. de H2O	4.6
Potencia	Hp	43

El resumen de las características del ventilador principal y de los ventiladores auxiliares a partir del modelo desarrollando en el software Ventsim se muestra en la tabla 19, las cuales fueron proveídas al fabricante.

Tabla 19. Características de los ventiladores de acuerdo al modelo en Ventsim

Item	Unidad	Ventilador Principal	Ventilador Auxiliar
Caudal	CFM	105,000	50,000
Presión Total	Pulg. de H2O	6.1	4.6
Potencia	Hp	118	43

3.10.5. Especificaciones técnicas de los ventiladores

El fabricante seleccionó los modelos para el ventilador principal y los ventiladores auxiliares de acuerdo a los datos proveídos según la simulación en el software Ventsim y a las consideraciones del lugar donde serán instalados.

De acuerdo a los ventiladores seleccionados, el fabricante proporciono las curvas características del ventilador principal y de los ventiladores auxiliares, los cuales se muestran en la figura 23 y figura 24 respectivamente; de las curvas características se pudieron obtener las especificaciones técnicas de los ventiladores a ser fabricados, esto de acuerdo a la determinación del punto de trabajo de cada ventilador, el resumen de estas especificaciones se detallan en la tabla 20.

Tabla 20. Especificaciones técnicas de los ventiladores.

Características	Unidades	Ventilador	
		Principal	Auxiliar
Modelo	-	VAV-54-26.5-1750-I-A	VAV-42 1/4-21-1750-I-B
Caudal de aire	CFM	105,944	50,880
Presión Total a 3750 msnm	Pulg. de H2O	5.97	4.49
Presión Estática a 3750 msnm	Pulg. de H2O	4.18	3.90
Potencia	Hp	123.07	45.75
Diámetro del ventilador	Pulg.	55.00	42.00
Eficiencia	%	81.06	78.76

Fuente: Airtec, (2017).

Ventilador # 43 :

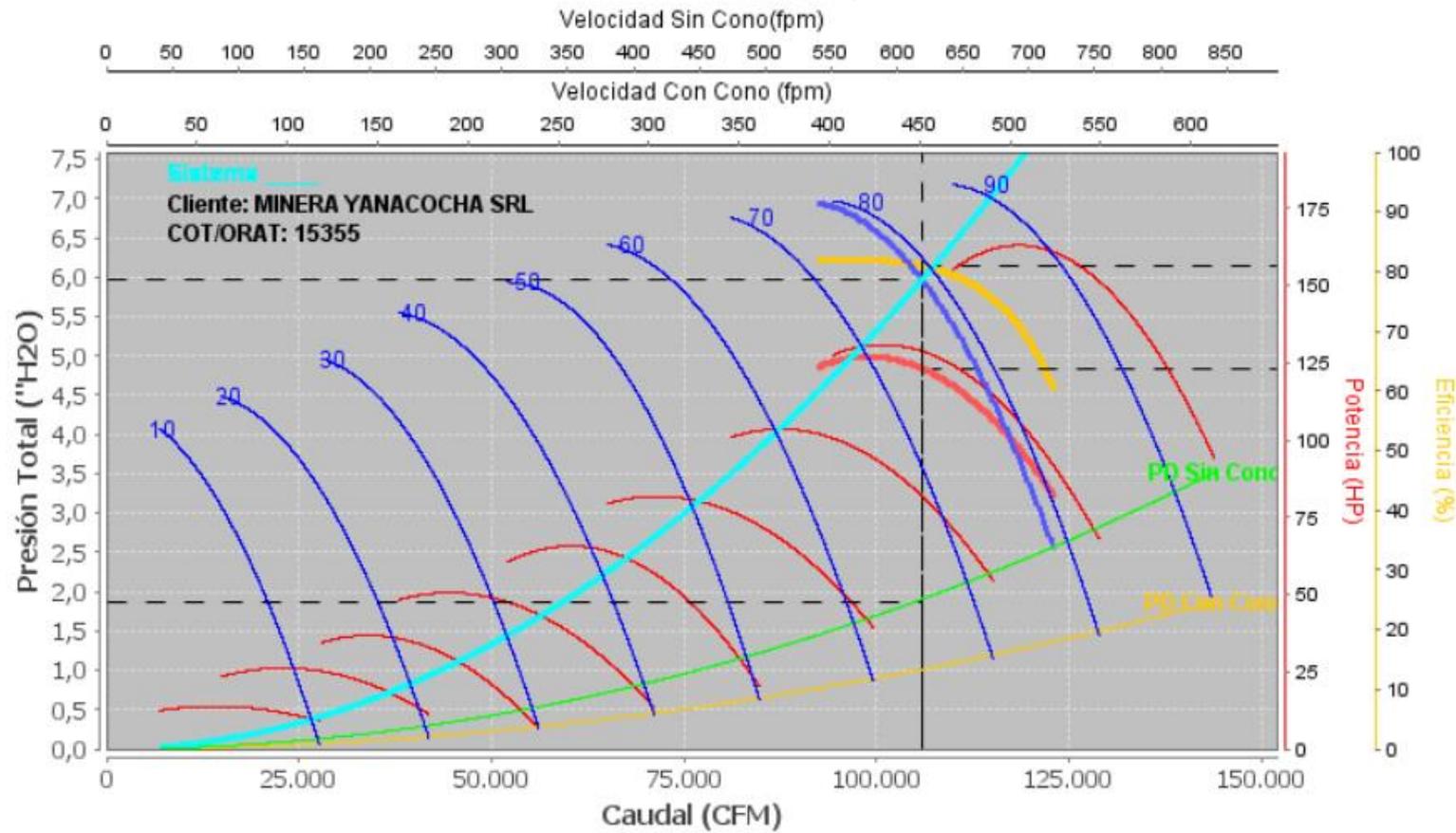
VAV-54-26.5-1750-I-A

Condiciones de Trabajo: a 3800.0 msnm y -4.70°C (STD.) de temperatura

Densidad (kg/m3): 0.83

Corrección: 0.69

Frecuencia: 60 Hz



Pto de Trabajo

P. Total ("H2O):

5.97

Caudal (CFM):

105944.0

Descarga:

Sin Cono

Calcular

Limpiar

Parámetros

Posición:

79

Potencia (HP):

123.21 HP

Eficiencia (%):

80.97 %

P. Est. Sin Cono:

4.10 "H2O

P.D. Sin Cono:

1.87 "H2O

P.D. Con Cono:

0.99 "H2O

Figura 23. Curva característica del ventilador principal. (Airtec, 2017).

Ventilador # 32 :

VAV-42 1/4-21-1750-I-B

Condiciones de Trabajo: a 3800.0 msnm y -4.70°C (STD.) de temperatura

Densidad (kg/m3): 0.83

Corrección: 0.69

Frecuencia: 60 Hz

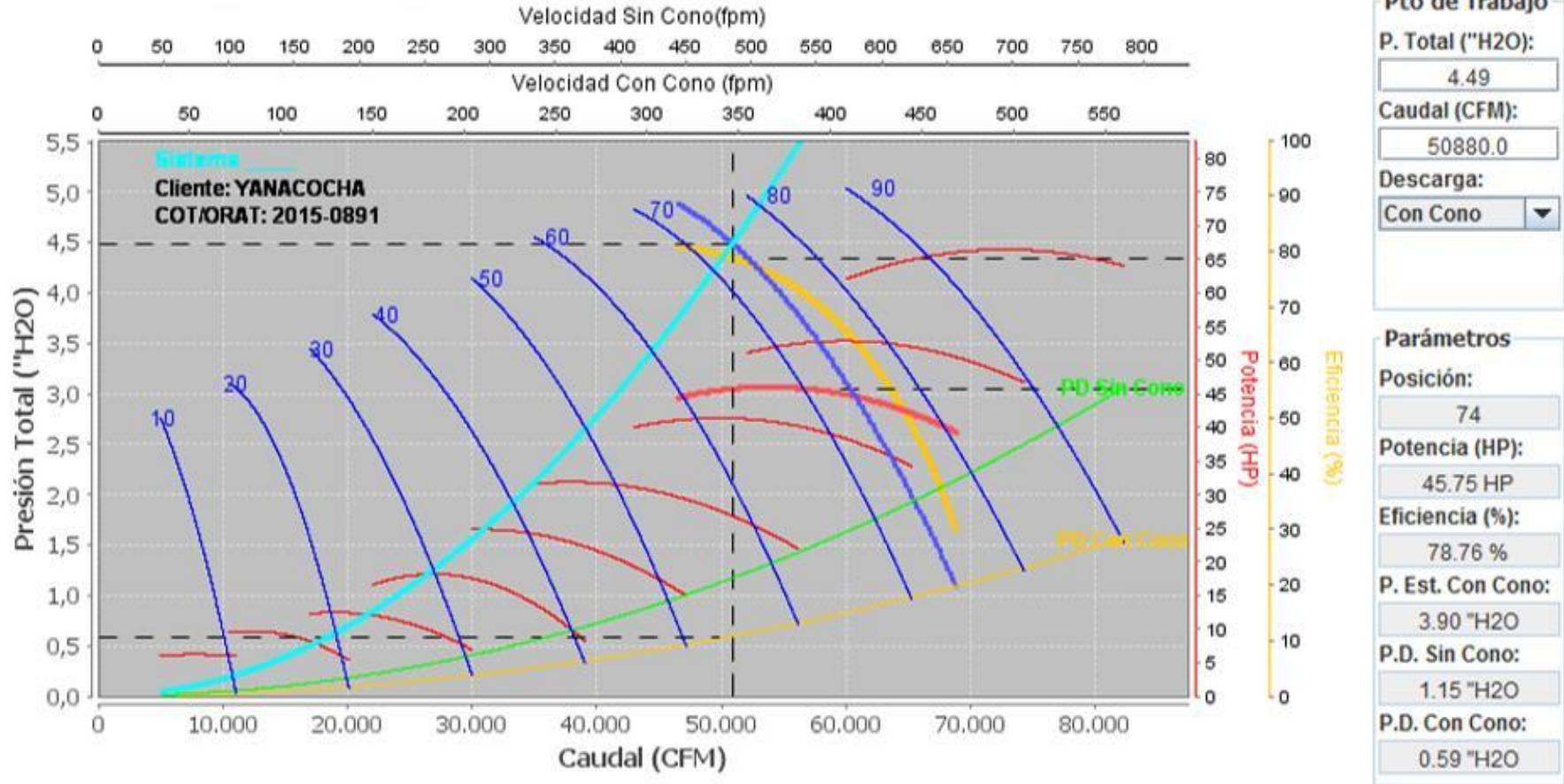


Figura 24. Curva característica de los ventiladores auxiliares. (Airtec, 2017).

3.10.6. Especificaciones técnicas de los conductos de ventilación

a) Ducto metálico

En función al ventilador principal seleccionado, se determinó la utilización de ductos metálicos de 55 pulgadas de diámetro, debido a que el material ofrece mayor resistencia durante la instalación y a las ondas producidas por las voladuras, las características que deben tener los ductos metálicos y las especificaciones del material a ser fabricados, se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Características de los ductos metálicos.

Item	Descripción
Longitud de ducto	3000 mm
Diámetro	55 pulgadas \approx 1400 mm
Tipo de material	Plancha galvanizada (1.2 mm)
Sección	Ducto circular
Peso/ducto	150 kg

Fuente: Airtec, (2017).

Las características de los ductos metálicos y las propiedades de la plancha galvanizada se detallan en el anexo 5.

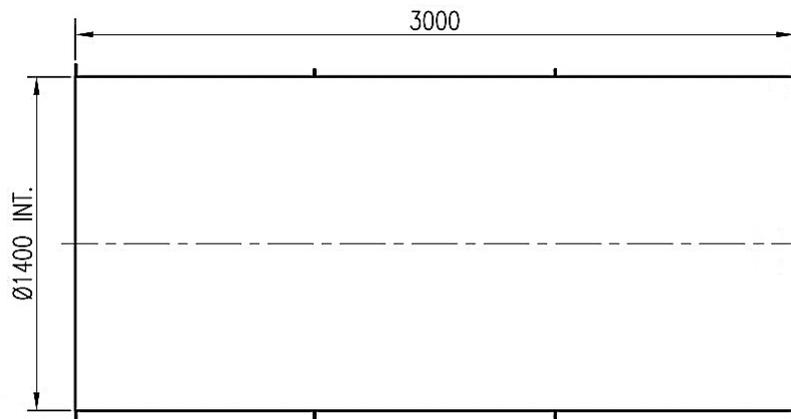


Figura 25. Dimensión del ducto metálico típico. (Airtec, 2017).

Los adaptadores de ductos se eligieron en función al recorrido que estos van a realizar, el tramo metálico instalado tiene un recorrido semejante al de las labores subterráneas

partiendo desde la bocamina, siguiendo por la Rampa 3750 y luego por las galerías 179 NW & la galería 179 SE.

La distribución general de ductos se muestra en el anexo 1, mientras que el detalle de los ductos metálicos y los adaptadores de ductos empleados se muestran en el anexo 5 y anexo 6 respectivamente.

b) Manga flexible de ventilación

En función a los ventiladores auxiliares seleccionados, se determinó la utilización de mangas flexibles de 42 pulgadas de diámetro, para lo cual se emplearon mangas Airolite FR-RSX, cuyo material base es de poliéster recubierto con PVC plastificado, con un peso total de 500 g/m². La presión máxima de trabajo permitido para la manga de ventilación, en función de su diámetro es de 25.8 Kpa.

Las características de la manga flexible de ventilación se muestran en el anexo 7.

3.10.7. Simulación del sistema de ventilación en Ventsim

El modelo de ventilación inicial del Túnel de Exploración Chaquicocha realizado en el software Ventsim, fue modificando reemplazando los flujos de aire por la incorporación de los ventiladores respectivos con sus curvas características, además se modificaron los datos correspondientes de los ductos metálicos de 55 pulgadas y de la manga de ventilación de 42 pulgadas, con la finalidad de tener un modelo mucho más próximo a la realidad y poder analizar el comportamiento del sistema de ventilación en cada una de las labores subterráneas, así como de verificar que los requerimientos de aire se encuentren de acuerdo a lo establecido en el DS-024-2016-EM del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería y su modificatoria según el DS-023-2017-EM.

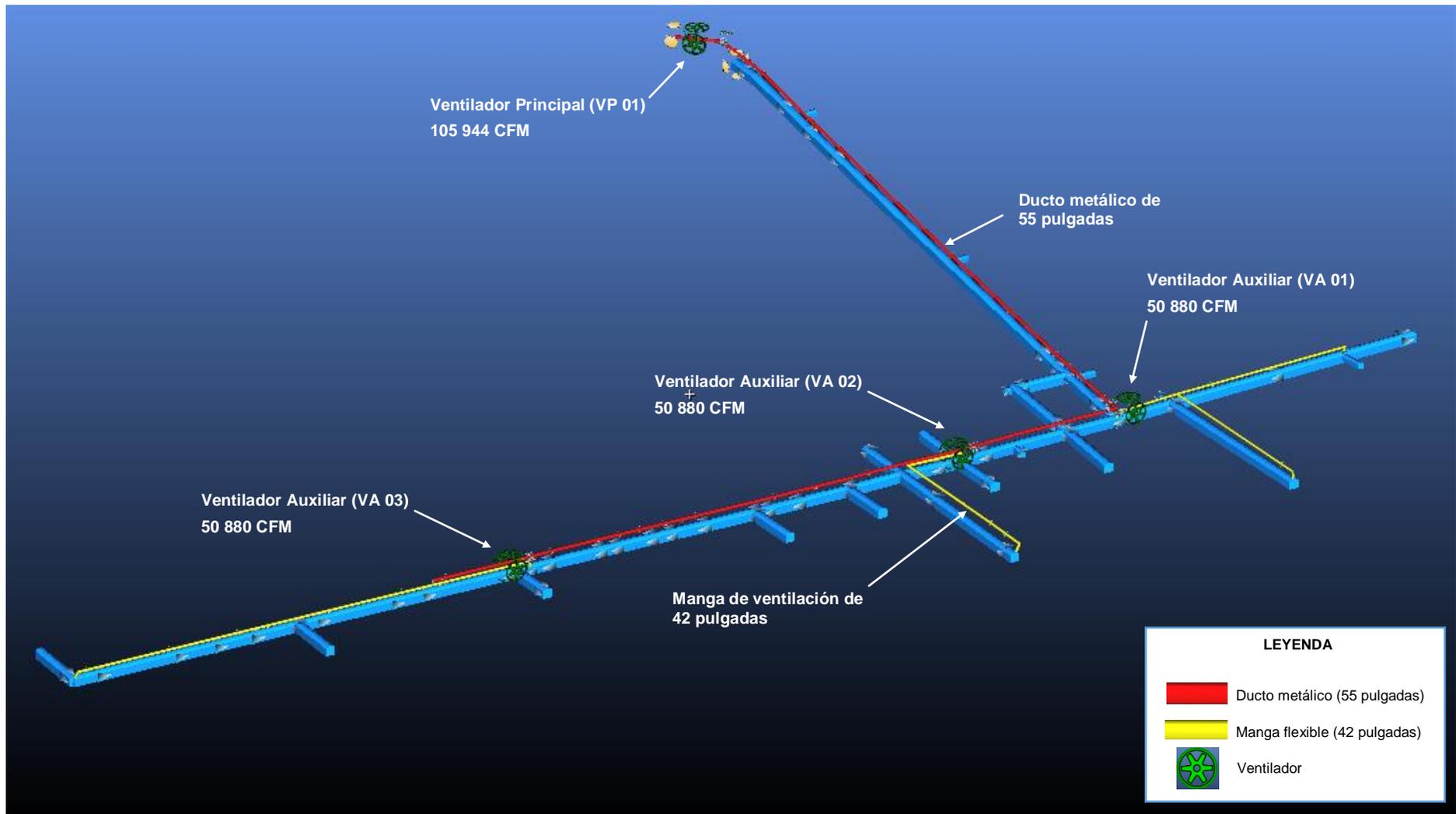


Figura 26. Modificación de la simulación del sistema de ventilación.

3.11. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

La implementación del sistema de ventilación consiste en la instalación del ventilador principal (aspirante) y los ventiladores auxiliares (impelentes) en las posiciones determinadas, así como la instalación de los ductos metálicos para la línea principal y la instalación de las mangas flexibles para los ventiladores auxiliares. La ubicación de los ventiladores se detalla en la tabla 22.

Tabla 22. Ventiladores del sistema aspirante con apoyo impelente.

Equipo	Tipo	Ubicación	Caudal (CFM)	Potencia (HP)	Presión (Pulg. H2O)
VP 01	Aspirante	Superficie	105,944	123.07	5.97
VA 01	Impelente	GAL 179 SE PK 0+002.5	50,880	45.75	4.49
VA 02	Impelente	GAL 179 NW PK 0+042.5	50,880	45.75	4.49
VA 03	Impelente	GAL 179 NW PK 0+162.5	50,880	45.75	4.49

3.11.1. Ventilador principal 01 (VP 01)

Ventilador aspirante, el cual extrae el aire viciado generado en el interior del Túnel a través de ductos metálicos de 55 pulgadas de diámetro, de las Galerías 179 SE y 179 NW direccionado por la Rampa 3750 hacia superficie. El ventilador principal fue instalado junto con sus accesorios que incluyen dos silenciadores, una campana difusora y un adaptador a ducto metálico, los cuales fueron montados sobre una base metálica ubicada a 10 m de la bocamina.



Foto 7. Ventilador Principal 01.

Los ductos metálicos fueron instalados en las labores subterráneas, empleando cadenas galvanizadas 5/16 pulgadas, las cuales fueron sujetadas a las placas de servicios mediante pernos, tuercas y arandelas, el esquema de instalación de ductos metálicos en interior mina se muestra en la figura 27.

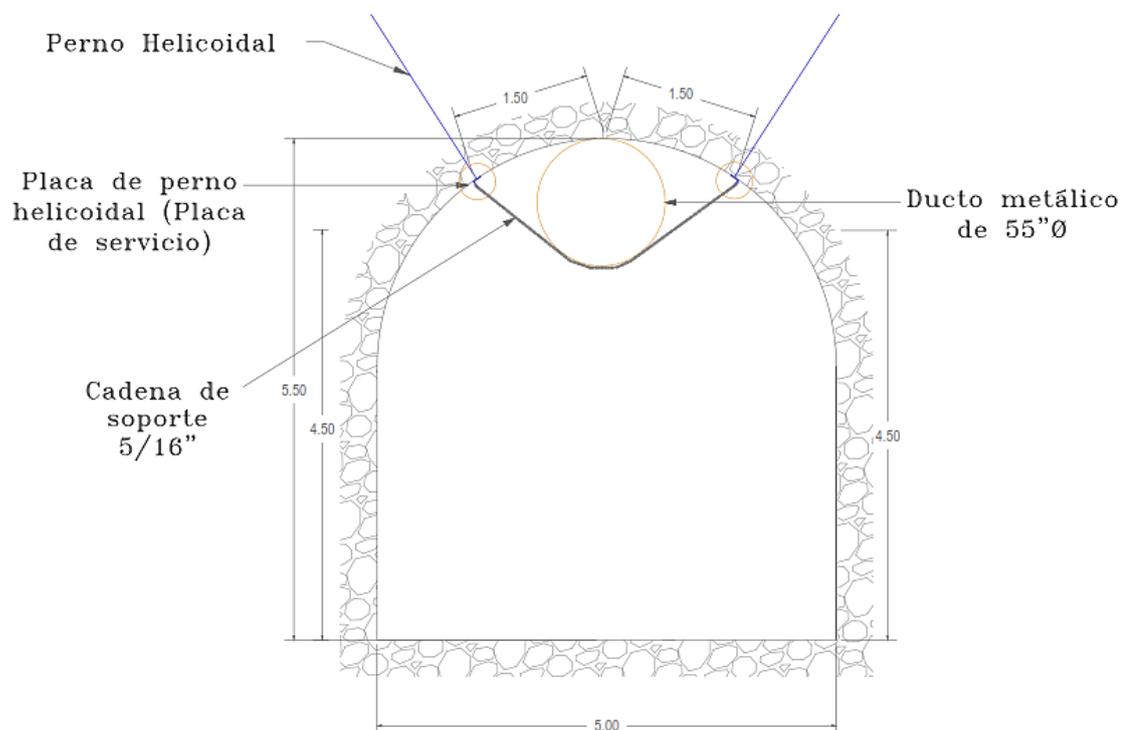


Figura 27. Esquema de instalación de ductos metálicos en AutoCAD.

3.11.2. Ventilador auxiliar 01 (VA 01)

Ventilador impelente que direcciona el aire fresco, instalado en la PK 0+002.5 de la Galería 179 SE, el cual capta el aire fresco que ingresa a través de la sección de la Rampa 3750, direccionando de esta forma el aire hacia el Crucero 195 SW y al tope de la Galería 179 SE. El ventilador se encuentra acoplado a 02 silenciadores, un adaptador a manga de ventilación y una campana difusora. El ventilador fue instalado mediante la utilización de cadenas galvanizadas de ½ pulgada sujetadas a las placas de pernos helicoidales de 8 pies de longitud, mientras que la manga fue instalada al adaptador mediante la utilización de una cinta band-it.

Para la instalación de la manga flexible de ventilación se empleó cable de acero de 1/8 de pulgada como línea mensajera para colgar los tramos de manga de mediante el uso de ganchos.



Foto 8. Ventilador auxiliar 01.

3.11.3. Ventilador auxiliar 02 (VA 02)

Ventilador impelente que direcciona el aire fresco, instalado en la PK 0+042.5 de la Galería 179 NW, el cual capta el aire fresco que ingresa a través de la sección de la Galería 179 NW, direccionando de esta forma el aire hacia el Crucero 239 SW. El ventilador se

encuentra acoplado a 02 silenciadores, un adaptador a manga de ventilación y una campana difusora. El ventilador fue instalado mediante la utilización de cadenas galvanizadas de ½ pulgada sujetadas a las placas de pernos helicoidales de 8 pies de longitud, mientras que la manga fue instalada al adaptador mediante la utilización de una cinta band-it.



Foto 9. Ventilador auxiliar 02.

3.11.4. Ventilador auxiliar 03 (VA 03)

Ventilador impelente que direcciona el aire fresco, instalado en la PK 0+162.5 de la Galería 179 NW, el cual capta el aire fresco que ingresa a través de la sección de la Galería 179 NW, direccionando de esta forma el aire fresco hacia el tope de la Galería 179 NW. El ventilador se encuentra acoplado a 02 silenciadores, un adaptador a manga de ventilación y una campana difusora. El ventilador fue instalado mediante la utilización de cadenas galvanizadas de ½ pulgada sujetadas a las placas de pernos helicoidales de 8 pies de longitud, mientras que la manga fue instalada al adaptador mediante la utilización de una cinta band-it.



Foto 10. Ventilador auxiliar 03.

3.12. MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

El monitoreo y control del sistema de ventilación se realizó periódicamente utilizando instrumentos de medición para el registro de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa.



Foto 11. Medición de caudal de aire con anemómetro TESTO 480.

En cuanto al control de la calidad de aire se realizó el monitoreo de concentración de gases periódicamente, el cual se registró y difundió en la pizarra de ventilación.

AESAI INFRAESTRUCTURA Y MINERÍA		MONITOREO DE GASES	
LABOR :	Cx 089	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES (TWA) O ₂ : 19.5 % CO : 25 ppm NO ₂ : 3 ppm SO ₂ : 2 ppm	
NIVEL :	37		
FECHA :	22-04-2018		
HORA :	8:15 am.		
RESPONSABLE :	Juvenal Carreón		
GASES GUARDIA DIA		GASES GUARDIA NOCHE	
O ₂ :	20.8	O ₂ :	
CO :	0	CO :	
NO ₂ :	0	NO ₂ :	
SO ₂ :	0	SO ₂ :	
H ₂ S :		H ₂ S :	10.0

Foto 12. Pizarra de ventilación con registro de concentración de gases.

3.12.1. Medición de caudal de aire

Se realizaron 02 mediciones de velocidad de aire, temperatura y humedad relativa en 04 estaciones de ventilación con la finalidad de obtener datos representativos del sistema de ventilación, para lo cual se utilizó un anemómetro Testo 480 para realizar las mediciones de velocidad de aire; y un anemómetro Kestrel 5200 para obtener datos de temperatura y humedad relativa.

En cada estación de ventilación, se tomaron 03 valores de velocidad de aire para poder determinar una velocidad promedio; además se realizó el levantamiento topográfico de las secciones transversales de cada estación de ventilación. El área real de las estaciones de ventilación para temas de cálculos, viene a estar dada por la resta del área de la sección transversal de la estación de ventilación menos el área circular del conducto de ventilación (manga de 42 pulgadas o ducto metálico de 55 pulgadas de diámetro). Con los datos de la velocidad de aire promedio y el área de la sección, se calculó el caudal de aire en cada una de las estaciones de ventilación.

a) **Medición 01:** Se consideraron 08 estaciones de ventilación definidas estratégicamente. Los datos de la medición 01 y el cálculo de los valores de los caudales de aire en cada estación de ventilación se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Medición 01 del sistema de ventilación implementado.

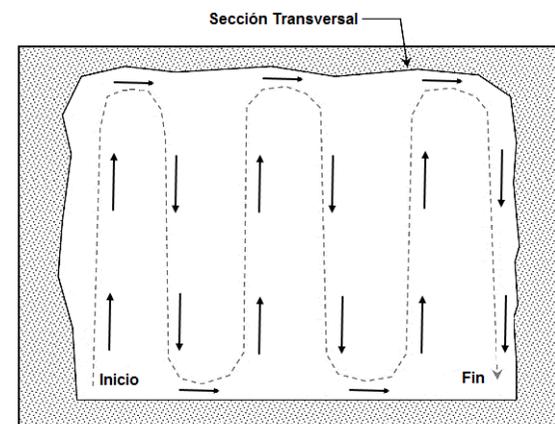
Labor	Estación	Área (m ²)	Velocidad (m/seg)				Caudal CFM	T °C	Hum Rel. %
			V1	V2	V3	V. Prom			
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	26.46	1.59	1.58	1.61	1.59	89,331	13.0	80.5
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.29	1.79	1.77	1.80	1.79	88,170	13.0	80.6
GA 179 SE (PK 0+035)	VS 03	25.53	0.92	0.94	0.90	0.92	49,767	16.0	81.0
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 04	24.70	1.66	1.66	1.67	1.66	87,053	15.0	80.7
GA 179 NW (PK 0+085)	VS 05	24.80	1.66	1.64	1.65	1.65	86,705	15.3	81.2
GA 179 NW (PK 0+130)	VS 06	28.00	1.46	1.44	1.47	1.46	86,422	16.5	81.5
GA 179 NW (PK 0+200)	VS 07	27.10	0.94	0.91	0.92	0.92	53,019	16.4	82.1
GA 179 NW (PK 0+240)	VS 08	26.80	0.89	0.93	0.94	0.92	52,243	17.8	83.2

Equipos utilizados

Anemómetro Testo 480

Anemómetro Kestrel 5200

Estación total Leica TS 09



b) Medición 02: Se consideraron 08 estaciones de ventilación definidas estratégicamente. Los datos de la medición 02 y el cálculo de los valores de los caudales de aire en cada estación de ventilación se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Medición 02 del sistema de ventilación implementado.

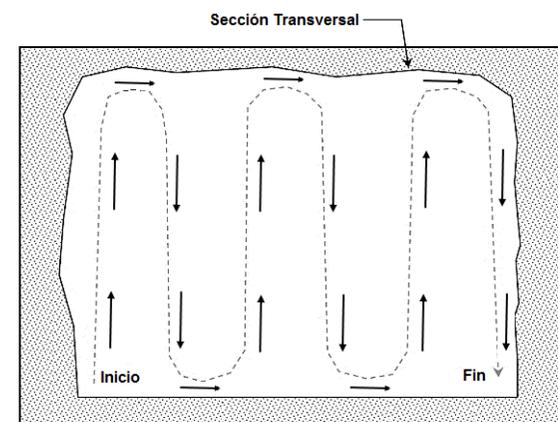
Labor	Estación	Área (m ²)	Velocidad (m/seg)				Caudal CFM	T °C	Hum Rel. %
			V1	V2	V3	V. Prom			
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	26.46	1.62	1.58	1.61	1.60	89,892	13.0	80.7
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.29	1.77	1.80	1.78	1.78	88,005	13.0	80.4
GA 179 SE (PK 0+035)	VS 03	25.53	0.91	0.89	0.93	0.91	49,227	16.0	81.3
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 04	24.70	1.66	1.69	1.67	1.67	87,576	15.0	80.6
GA 179 NW (PK 0+085)	VS 05	24.80	1.63	1.66	1.64	1.64	86,354	15.4	80.5
GA 179 NW (PK 0+130)	VS 06	28.00	1.45	1.45	1.46	1.45	86,224	16.3	81.5
GA 179 NW (PK 0+200)	VS 07	27.10	0.94	0.97	0.95	0.95	54,742	17.1	81.9
GA 179 NW (PK 0+240)	VS 08	26.80	0.96	0.93	0.94	0.94	53,568	18.0	82.8

Equipos utilizados

Anemómetro Testo 480

Anemómetro Kestrel 5200

Estación total Leica TS 09



3.12.2. Análisis de las mediciones de caudal de aire

De las 02 mediciones realizadas se calculó el caudal de aire promedio en cada estación de monitoreo, la cual se muestra en la tabla 25.

Tabla 25. Caudal de aire promedio del sistema de ventilación implementado.

Labor	Estación	Área	V. Promedio	Caudal
		(m ²)	(m/seg)	CFM
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	26.46	1.60	89,612
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	23.29	1.79	88,088
GA 179 SE (PK 0+035)	VS 03	25.53	0.92	49,497
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 04	24.70	1.67	87,315
GA 179 NW (PK 0+085)	VS 05	24.80	1.65	86,529
GA 179 NW (PK 0+130)	VS 06	28.00	1.46	86,323
GA 179 NW (PK 0+200)	VS 07	27.10	0.94	53,881
GA 179 NW (PK 0+240)	VS 08	26.80	0.93	52,906

Para determinar la cobertura de caudal de aire del sistema de ventilación implementado se consideró el caudal medido en la estación VS 03 y como caudal de aire requerido se consideró el valor para un ventilador auxiliar, la cobertura de caudal de aire se detalla en la tabla 26.

Tabla 26. Cobertura de aire del sistema de ventilación implementado.

Item	Caudal (CFM)
Caudal de aire requerido	38,233
Caudal de aire medido	49,497
Cobertura	129%

De acuerdo al análisis del sistema de ventilación, se concluye que el caudal de aire suministrado por el sistema de ventilación cumple con los requerimientos en cuanto a cantidad de aire, ya que se tiene una cobertura del 129%, lo cual indica un buen desempeño del sistema de ventilación.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con la investigación, se realizó la evaluación del sistema de ventilación inicial, dando como resultado una cobertura de aire del 90%, por tal motivo se realizó una optimización del sistema de ventilación, donde la Asesoría de Ventilación de Newmont recomendó la utilización de un sistema de ventilación del tipo aspirante con apoyo impelente, realizando la implementación de 01 ventilador principal aspirante y de 03 ventiladores auxiliares impelentes, los cuales permiten asegurar un flujo de aire en cantidad y calidad suficientes en todas las labores subterráneas; de las mediciones realizadas se tiene como resultado una cobertura de aire del 129%. En la tabla 27 se muestran los valores de la cobertura de aire de ambas evaluaciones.

Tabla 27. Evaluación de los sistemas de ventilación.

Item	Sistema de ventilación	
	Inicial	Implementado
Caudal de aire requerido (CFM)	40,060	38,233
Caudal de aire medido (CFM)	36,082	49,497
Cobertura (%)	90%	129%

4.2. ANÁLISIS DEL CAUDAL DE AIRE

Para poder analizar el funcionamiento del sistema de ventilación se debe comparar los valores del caudal de aire medidos en campo con los valores del modelo realizado en el software Ventsim, el porcentaje de variación de los caudales de aire, dará un indicativo si el sistema esta funcionando de acuerdo a lo diseñado.

a) Estación de ventilación 01 (VS 01)

La estación de ventilación 01 se encuentra ubicado en la PK 0+49.5 de la Rampa 3750. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestran en la tabla 28.

Tabla 28. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 01.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	91,466	89,612	2.0%

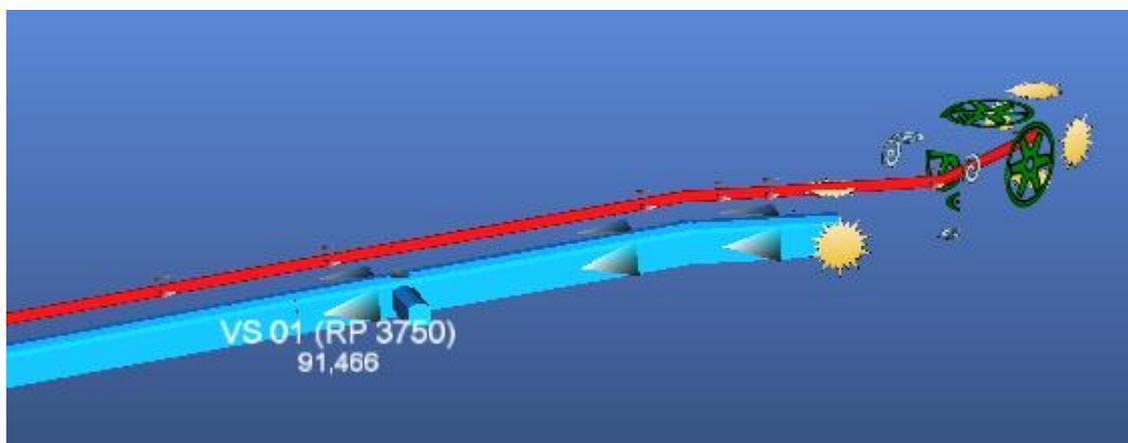


Figura 28. Caudal de aire en la estación de ventilación 01.

b) Estación de ventilación 02 (VS 02)

La estación de ventilación 02 se encuentra ubicado en la PK 0+129.5 de la Rampa 3750. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 02.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	91,260	88,088	3.5%

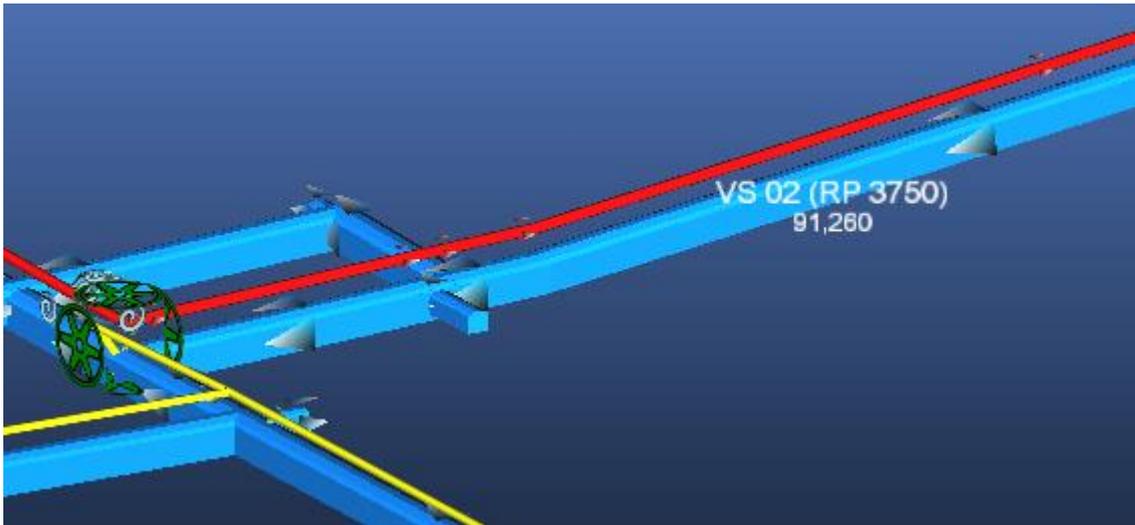


Figura 29. Caudal de aire en la estación de ventilación 02.

c) Estación de ventilación 03 (VS 03)

La estación de ventilación 03 se encuentra ubicado en la PK 0+035 de la Galería 179 SE. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestran en la tabla 30.

Tabla 30. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 03.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 SE (PK 0+035)	50,490	49,497	2.0%



Figura 30. Caudal de aire en la estación de ventilación 03.

d) Estación de ventilación 04 (VS 04)

La estación de ventilación 04 se encuentra ubicado en la PK 0+020 de la Galería 179 NW. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 04.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 NW (PK 0+020)	91,245	87,315	4.3%

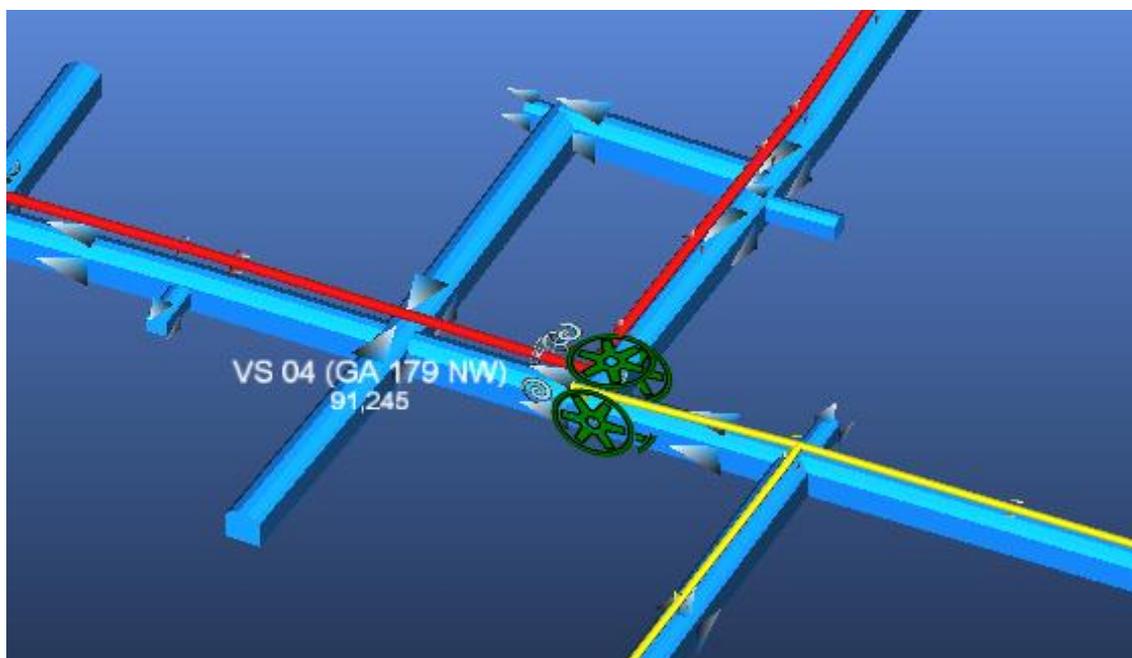


Figura 31. Caudal de aire en la estación de ventilación 04.

e) Estación de ventilación 05 (VS 05)

La estación de ventilación 05 se encuentra ubicado en la PK 0+085 de la Galería 179 NW. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 05.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 NW (PK 0+085)	91,084	86,529	5.0%

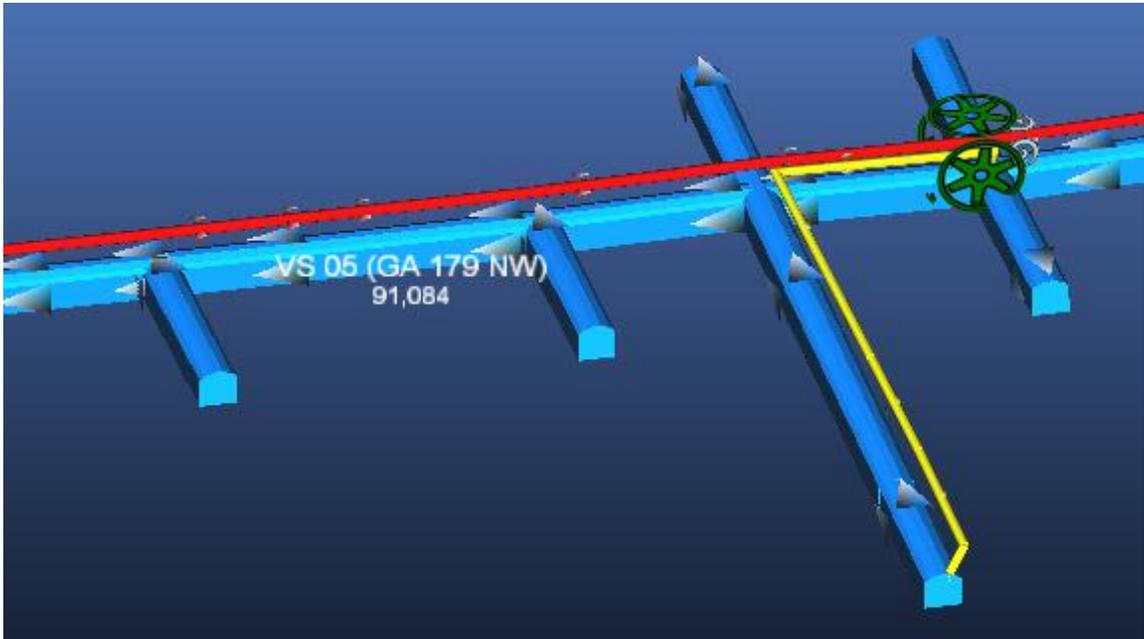


Figura 32. Caudal de aire en la estación de ventilación 05.

f) Estación de ventilación 06 (VS 06)

La estación de ventilación 06 se encuentra ubicada en la PK 0+130 de la Galería 179 NW. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestra en la tabla 33.

Tabla 33. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 06.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 NW (PK 0+130)	91,076	86,323	5.2%

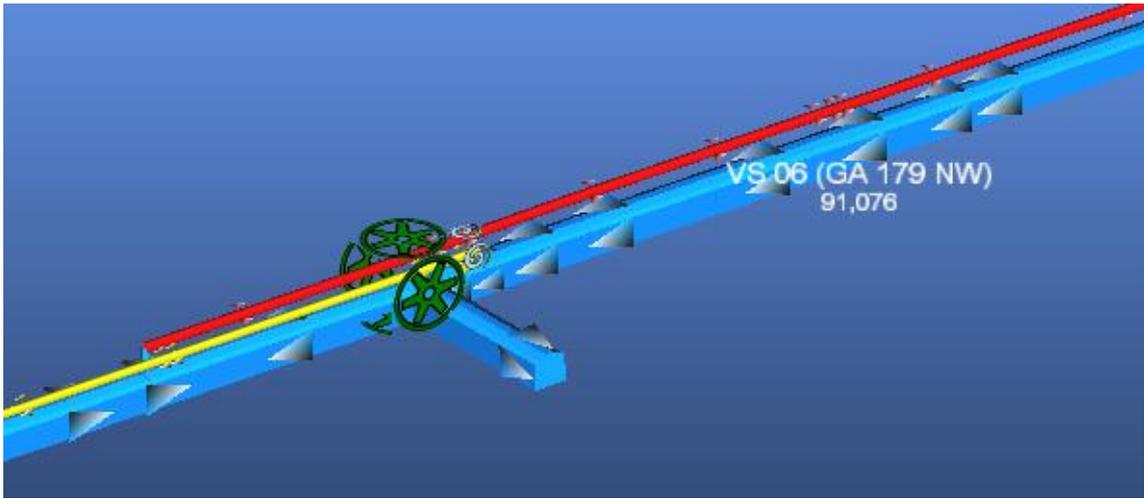


Figura 33. Caudal de aire en la estación de ventilación 06.

g) Estación de ventilación 07 (VS 07)

La estación de ventilación 07 se encuentra ubicado en la PK 0+200 de la Galería 179 NW. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestra en la tabla 34.

Tabla 34. Variación de caudales de aire en la estación de ventilación 07.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 NW (PK 0+200)	55,505	53,881	2.9%

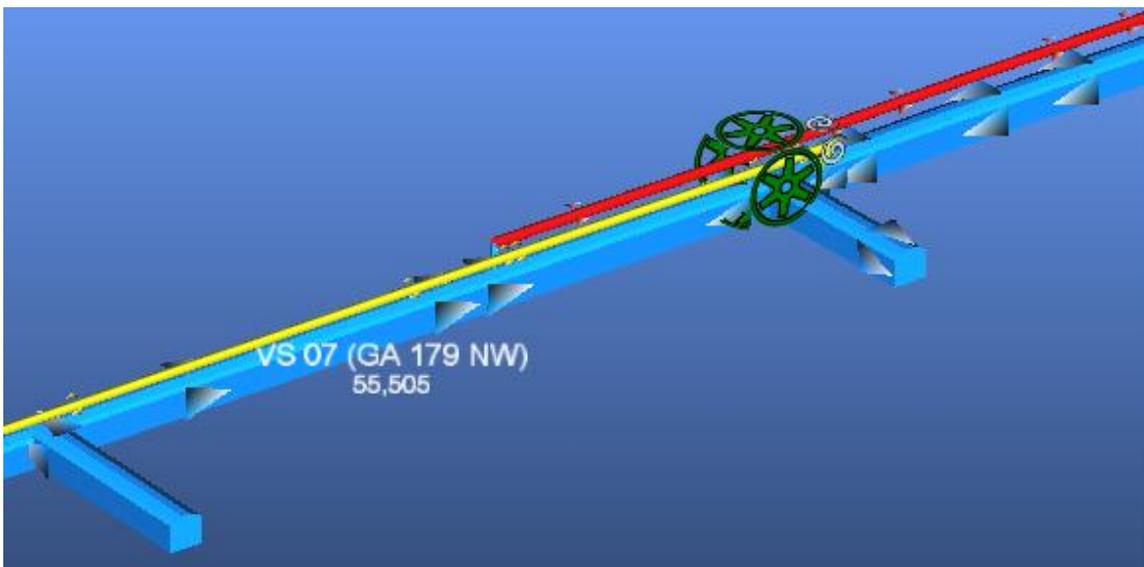


Figura 34. Caudal de aire en la estación de ventilación 07.

h) Estación de ventilación 08 (VS 08)

La estación de ventilación 08 se encuentra ubicado en la PK 0+240 de la Galería 179 NW. La variación de caudal de aire entre los valores medidos en campo con relación a los valores obtenidos del modelo en Ventsim, se muestra en la tabla 35.

Tabla 35. Variación de caudales en la estación de ventilación 08.

Labor	Caudal (CFM)		Variación
	Ventsim	Campo	
GA 179 NW (PK 0+240)	55,456	52,906	4.6%

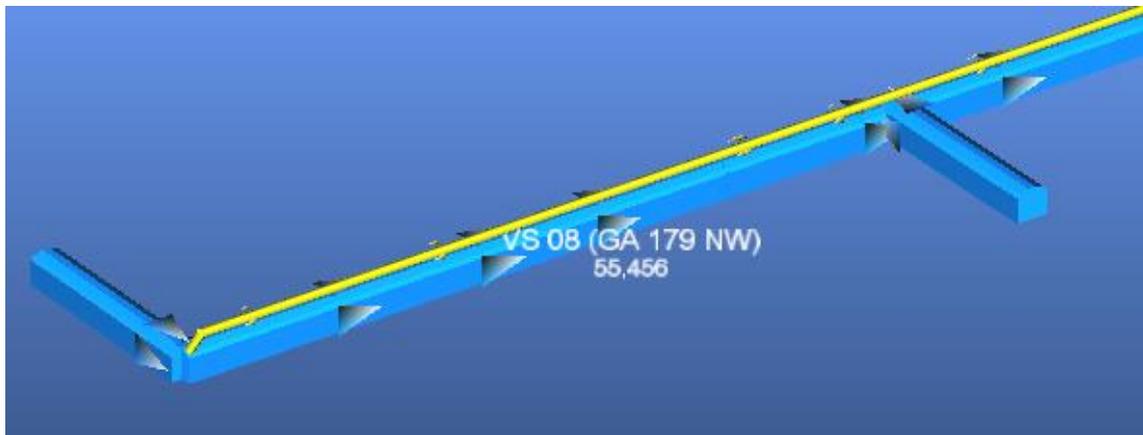


Figura 35. Caudal de aire en la estación de ventilación 08.

El resumen de las variaciones de los caudales de aire en las 08 estaciones de ventilación se detalla en la tabla 36.

Tabla 36. Resumen de variaciones de caudal de aire.

Labor	Estación	Caudal (CFM)		Variación
		Ventsim	Medido	
RP 3750 SW (PK 0+049.5)	VS 01	91,466	89,612	2.0%
RP 3750 SW (PK 0+129.5)	VS 02	91,260	88,088	3.5%
GA 179 SE (PK 0+035)	VS 03	50,490	49,497	2.0%
GA 179 NW (PK 0+020)	VS 04	91,245	87,315	4.3%
GA 179 NW (PK 0+085)	VS 05	91,084	86,529	5.0%
GA 179 NW (PK 0+130)	VS 06	91,076	86,323	5.2%
GA 179 NW (PK 0+200)	VS 07	55,505	53,881	2.9%
GA 179 NW (PK 0+240)	VS 08	55,456	52,906	4.6%

Del resumen de las variaciones de caudal de aire se tiene que los valores medidos en campo 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 en el modelo de ventilación realizado en el software Ventsim se obtienen valores en condiciones ideales; el porcentaje de las variaciones de caudal de aire representa un margen de error aceptable, por lo que la implementación de la propuesta de optimización del sistema de ventilación se realizó satisfactoriamente.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la investigación se contrastó la hipótesis, la cual afirma que a partir de la evaluación del sistema de ventilación inicial del Túnel de Exploración Chaquicocha Nivel 3750, se pudo realizar una optimización, ya que no cumplía con los requerimientos de caudal de aire; la optimización consistió en la implementación de un sistema de ventilación del tipo aspirante con apoyo impelente, el cual provee una cobertura de caudal de aire de 129%, asegurando una buena ventilación en todas las labores subterráneas, esto de acuerdo a las mediciones de aire realizadas en cada una de las estaciones de ventilación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El sistema de ventilación inicial tiene una cobertura de caudal de aire del 90%, por tal motivo no cumple con los requerimientos en cuanto a cantidad de aire en todas las labores subterráneas desarrolladas.
- El sistema de ventilación implementado es del tipo aspirante con apoyo impelente, el cual según la evaluación tiene una cobertura del 129%, es decir que el caudal de aire suministrado por el sistema cumple con los requerimientos en cuanto a cantidad de aire e indica un buen desempeño en su funcionamiento.
- 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.

5.2. RECOMENDACIONES

- Verificar el certificado de calibración de los anemómetros antes de realizar las mediciones en las estaciones de ventilación.
- Realizar las mediciones de aire lo más amplio y completo posible, haciendo circular el anemómetro a lo largo de toda la sección de la estación de ventilación.
- Realizar la medición de aire en la estación de ventilación, verificando que no hayan personas u objetos que obstruyan el flujo de aire para obtener un valor representativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agüero, H; Álvarez, H. 2012. Influencia de la ventilación natural y mecánica en el diseño del sistema de ventilación de las galerías del nivel 1950 Mina Calpa – Arequipa. Tesis Lic. Huancavelica, Perú, Universidad Nacional de Huancavelica. 63 p.
- Airtec. 2017. Estudio de ventilación del proyecto Chaquicocha North Exploration Drift. Informe Técnico. Lima, Perú. 32 p.
- Carabajo, C. 2015. Diseño del circuito de ventilación de la zona norte de la Mina Cabo de Hornos, ubicada en el distrito aurífero - polimetálico Portovelo – Zarumala. Tesis Lic. Quito, Ecuador, Universidad Central del Ecuador. 203 p.
- Claverias, J. 2014. Evaluación y optimización del sistema de ventilación de la Compañía Minera Caraveli S.A.C. aplicando el software Ventsim Visual 3. Tesis Lic. Arequipa, Perú, Universidad Nacional de San Agustín De Arequipa. 130 p.
- Córdova, C; Molina Escobar, JM. 2011. Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. Boletín de Ciencias de la Tierra (29): 73-86.
- Basurto, J. 2014. Validación del muestreo de blastholes por canales en zonas de mineralización de sulfuros, Proyecto Yanacocha Verde-Cajamarca. Informe de suficiencia. Lima, Perú, Universidad Nacional de Ingeniería. 82 p.
- Jiménez, P. 2011. Ventilación de minas subterráneas y túneles: Práctica, aplicada y avanzada en minería clásica y minería por trackles. Lima, Perú, Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. 255 p.
- Kingery, D. 1960. Introduction to mine ventilating principles and practices. Whashington. United States. 53 p.
- López, C. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas. Madrid, España, ETSI Minas - Universidad Politécnica de Madrid. 2998 p.

- Luque, V. 1988. Manual de ventilación de minas. España, Asociación de Investigación Tecnológica de Equipos Mineros (ATEMIN).
- Novistky, A. 1962. Ventilación de minas. Buenos Aires, Argentina. 552 p.
- Poma, J. 2016. Informe de servicios auxiliares Túnel de Exploración Chaquicocha. Informe Técnico. Cajamarca, Perú. 21 p.
- Positiva. 2017. Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas (en línea, sitio web). Consultado el 03 may. 2019. Disponible en https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23980938/010318_guia_seg_ventilacion_minas_subterraneas.pdf/52d1871d-37c0-45fe-9951-1b2adff92289
- Saldaña, A. 2013. Productividad en el ciclo de carguío y acarreo en el tajo Chaquicocha bajo clima severo-Minera Yanacocha. Lima, Perú, Universidad Nacional de Ingeniería. 246 p.
- SERNAGEOMIN. 2008. Guía metodológica de seguridad para proyectos de ventilación de minas. Consultado el 03 may. 2019. Disponible en <https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2018/12/200812GuiaVentilacionMinas.pdf>
- Vilela, W. 2014. Análisis de factibilidad para el uso de Anfo pesado a base de emulsión gasificable en Minera Yanacocha. Tesis Lic. Cajamarca, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. 83 p.
- Zamora, P. 2005. Geología del depósito de Chaquicocha Sur (en línea, sitio web). Consultado el 03 may. 2019. Disponible en <https://es.scribd.com/document/349772564/Chaquicocha-pdf>
- Zitrón. 2010. Ventilación de minas. Gijón, España. 179 p.

ANEXOS

1. Anexo 1. Plano general del sistema de ventilación implementado.
2. Anexo 2. Ficha técnica del ventilador principal.
3. Anexo 3. Ficha técnica del ventilador auxiliar.
4. Anexo 4. Ficha técnica ducto galvanizado.
5. Anexo 5. Ducto metálico típico.
6. Anexo 6. Adaptadores metálicos.
7. Anexo 7. Ficha técnica de la manga flexible de ventilación.
8. Anexo 8. Autorización para el uso de la información de Minera Yanacocha.

Señores
MINERA YANACOCHA S.R.L
 AV.LA PAZ N°1049 INT.P-5
 MIRAFLORES - LIMA

ESPECIFICACIONES TECNICAS

**1. VENTILADOR AXIAL MINERO DE ALETAS AERODINAMICAS Y PASO VARIABLE,
 MARCA AIRTEC, MODELO VAV-54-26.5-1750-I-B (SIMPLE ETAPA-ALTA PRESION)
 CANTIDAD: 002**

Características:

Caudal de Aire	: 50.0 m ³ /s / 105,944.00 CFM
Presión TOTAL a nivel mar y 20°C	: 2,154.62 Pa / 8.65" H ₂ O
Presión ESTÁTICA a nivel mar y 20°C	: 1,479.59 Pa / 5.94" H ₂ O
Consumo Fuerza a nivel mar y 20°C	: 131.34 Kw / 178.57 BHP
Presión TOTAL a 3800msnm	: 1,487.06 Pa / 5.97" H ₂ O
Presión ESTÁTICA a 3800msnm	: 1,021.26 Pa / 4.10" H ₂ O
Consumo Fuerza a 3800msnm	: 90.62 Kw / 123.21 BHP
RPM Ventilador	: 1750
Transmisión	: Directa
Diámetro del ventilador	: Ø54" - 1372 mm.
Eficiencia	: 80.97%
Nivel de ruido	: 105 dB(A)(SIN SILENCIADORES)

MOTOR TRIFASICO, MARCA "BALDOR" IEEE-841

NORMA NEMA PREMIUN EFFICIENCY	Potencia Nom.: 111.9 Kw / 150 HP
Voltaje	: 460 V
Frecuencia	: 60 Hz
RPM	: 1800
Cerramiento	: TEFC
Procedencia	: EE.UU.
F.S.	: 1.15
Eficiencia Nema	: 95.8%
Grado Prot.	: IP56
Sellos	: Impro-seal

Incluye:

- Detector de temperatura (RTD 100 Ohm, platino), 02 por fase.
- Detector de temperatura (RTD 100 Ohm, platino), 01 por rodamiento.
- Cables Extendidos.
- Space Heaters (460 V).
- Altura de trabajo 3800 msnm.
- Una placa extra con los mismos datos del motor.
- Preparado para uso con Variador.
- Lubricación de rodamientos: sistema de lubricación positiva (mantiene los rodamientos a 45°C)

- Cable de bobinados: isr - inverter spike resistant magnet wire clase h 2kv / 200°c (el motor es de aislamiento clase F pero con cable de bobinado en AISLAMIENTO CLASE H - superior a un motor con clase de aislamiento convencional).

MATERIAL IMPULSOR	: Aleación especial de aluminio, con tratamiento térmico.
CARCASA	: Acero estructural ASTM A-36.
OTROS	: Acero estructural ASTM A-36.
REVESTIMIENTO	: Pintura Epóxica con base zincromato y arenado a metal blanco (SSPC-SP5).

2. ADAPTADOR A MANGA PARA VENTILADOR MINERO VAV-54 (REDUCER)

CANTIDAD: 002

- Modelo	: DDL-54.
- Tipo	: Adaptador a manga.
- Diámetro Menor	: 54"Ø.
- Diámetro Mayor	: Manga Ø55"
- Longitud	: Según diseño.
- Función	: Recuperación de Presión Estática.

3. ATENUADOR DE NIVEL DE RUIDO PARA VENTILADOR MINERO VAV-48

CANTIDAD: 004

- Modelo	: S-VAV-54
- Medidas	: Ø 1372 int x 2895 aprox.
- Material	:
+ Aislante de ruido	: Lana de vidrio
+ Ducto interior	: Pl. galv. Perforada 1/16"
+ Carcasa	: Plancha ASTM A36
- Revestimiento	: Pintura Epóxica, con base zincromato.

4. TABLERO ARRANCADOR POR VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTOR DE VENTILADOR 111.9 Kw / 150HP @ 460VAC, 3F, 60Hz, 3800 M.S.N.M., INCLUYE SISTEMA DE ALARMAS POR FALLAS Y SISTEMA DE MEDICION DE VARIABLES DE PROCESO Y ALARMA.

CANTIDAD: 002

Suministro de (01) Tablero eléctrico de tipo autoportado de dos cuerpos, fabricación nacional, techo inclinado con plancha de fierro LAF de 2 mm de espesor, puerta de acceso frontal fabricada con plancha de fierro LAF de 2mm de espesor, paneles soldados, con cerraduras, empaquetaduras de jebes en todo el perímetro para cierre hermético. Grado de protección IP54.

La superficie de cada gabinete metálico será sometida a un tratamiento de limpieza profunda de las superficies y a la protección de su estructura con dos capas de pintura base anticorrosiva y dos capas de pintura esmalte de secado al horno RAL naranja 2004.

Características Técnicas:

Tensión de servicio : 440V
Tensión de control : 120V
Altura de Trabajo : 3800 m.s.n.m.
Grado de protección : IP54

Dimensiones aproximadas:

Alto : 2000 mm.
Ancho : 1600 mm
Fondo : 600 mm.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

DESCRIPCIÓN

VENTILADOR AXIAL

Marca equipo	AIRTEC
Modelo - código	VAV-42.25-26.5-1750-I-B
Cantidad	3
Caudal de aire	50000 CFM(24 m3/s)
Presión total a nivel del mar	9.5 InH2O
Consumo fuerza nivel del mar	105.23 BHP
Presión total a 3800 msnm	6.0 InH2O
Consumo fuerza a 3800 msnm	66.23 BHP
RPM Ventilador	3450
Eficiencia	71.50%
Transmisión	Directa
Nivel de ruido	110 dB
Motor	BALDOR NEMA PREMIUN
Potencia	75 HP
Voltaje	460 V
Frecuencia	60 Hz
RPM	1800
Encerramiento	TEFC
Grado de protección	IP56
Procedencia	EE.UU
Sello	Aleación especial de aluminio con
Material Impulsores	tratamiento térmico
Revestimiento	Pintura Epóxica con base zincromato y arenado a metal blanco (SSPC-SPS).

TABLERO DE ARRANQUE

Tipo de arranque	Variador de frecuencia
Potencia	75 HP
Cantidad	12
Voltaje	460V
Frecuencia	60Hz
Altitud de trabajo	3800 msnm
Grado de protección	IP54

SILENCIADORES

Marca de equipo	AIRTEC
Modelo	S-VAV-42.25
Cantidad	24
Nivel de atenuamiento	10 -12 dB
Material	ASTM - 36
Aislamiento de ruido	Lana de vidrio
Ducto interior	Pl. galvanizada perforada 1/16"
Carcaza	Plancha ASTM A36
Revestimiento	Pintura Epóxica con base zincromato

FICHA TECNICA

Cliente	MINERA YANACOCHA S.R.L	Fecha	
Tipo	DUCTO METALICO	Codigo	
Uso	Ventilacion - Minera Subterranea	Serie	

CARACTERISTICAS - PLANCHA GALVANIZADA

Caudal	90,000CFM	Tipo de Material	Plancha Galvanizada
Diametro	Ø 1400 mm	Espesor	1.2mm
Norma	ASTM/ A653/A653M	Longitudes	3000mm
Uniones	Bridadas	Seccion	Ducto Circular
Norma	ASTM/ A653/A653M	Longitudes	3000mm

PROPIEDADES MECANICAS - PLANCHA GALVANIZADA

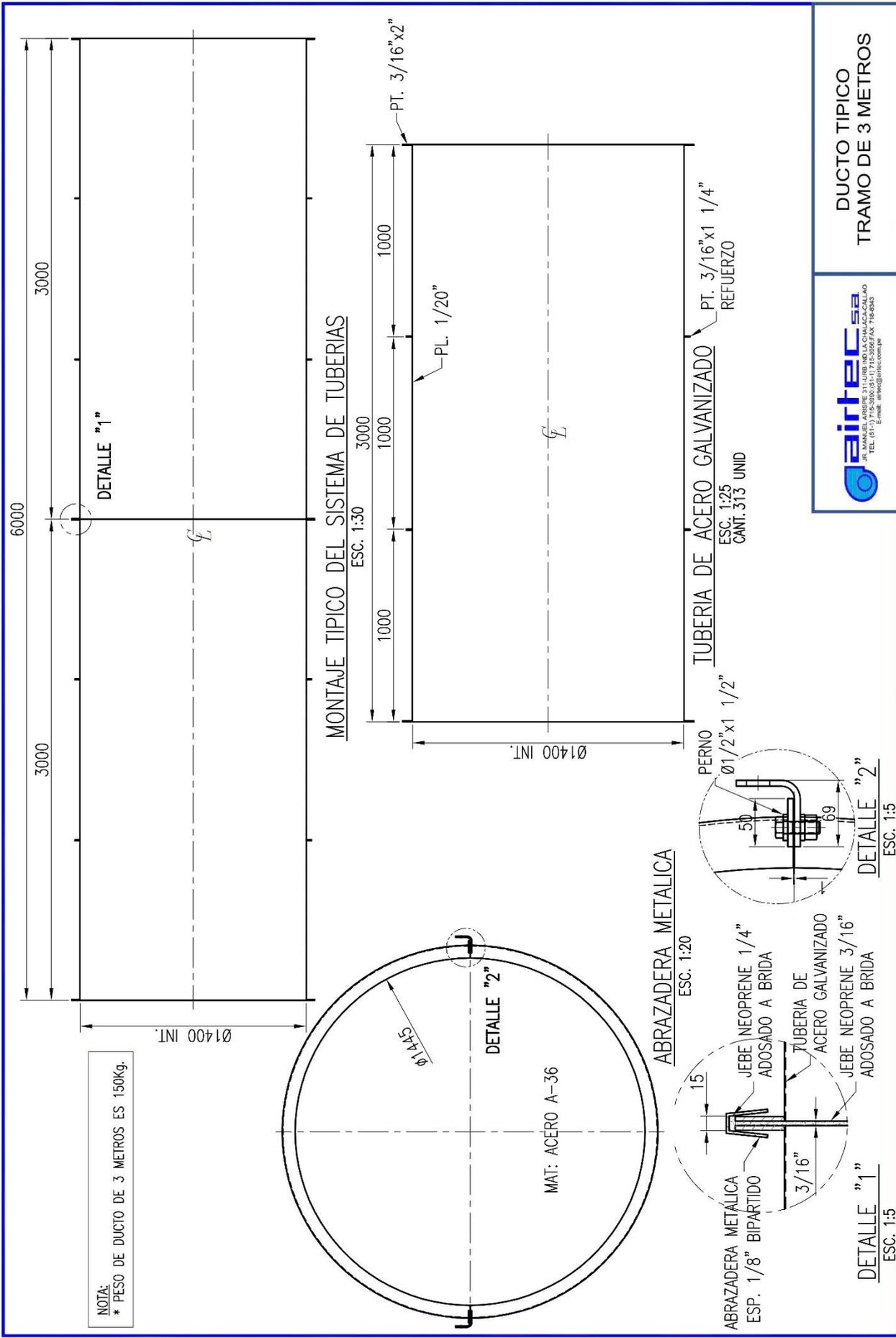
Limete de Fluencia	275Mp	Resistencia a la traccion	380Mpa
Elongacion Min. (2")	16%		

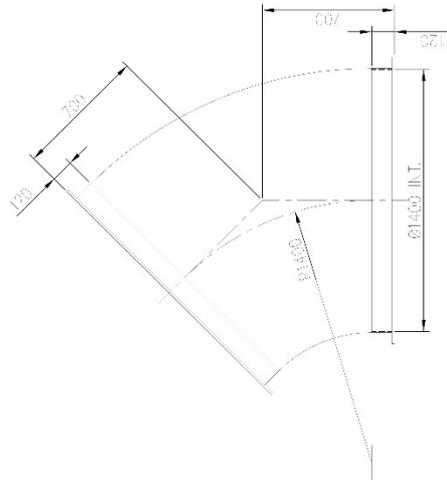
CARACTERISTICAS - PLATINA DE FIERRO *

Caudal	90,000CFM	Tipo de Material	Platina de Fierro
Grosor	2 pulg	Espesor	3/16 pulg
Norma	ASTM 36	Longitudes	-
Uniones	Soldadas	Seccion	Circular
Norma	ASTM 36	Longitudes	-

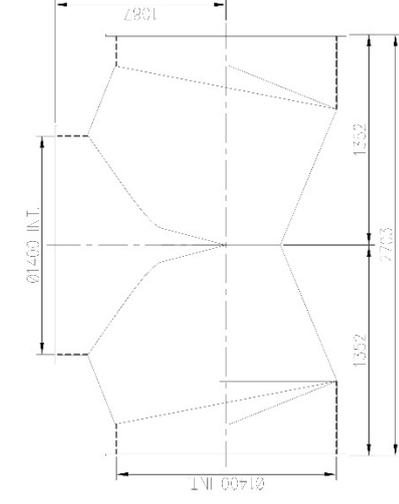
PROPIEDADES MECANICAS - PLATINA DE FIERRO *

Limete de Fluencia	2530 kg/ cm2	Resistencia a la traccion	4080 - 5620 kg/cm2
Elongacion Min. (200mm)	15%	Doblado a 180°	Buena

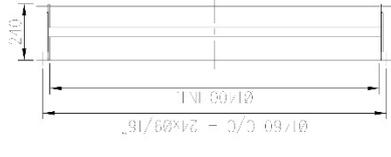




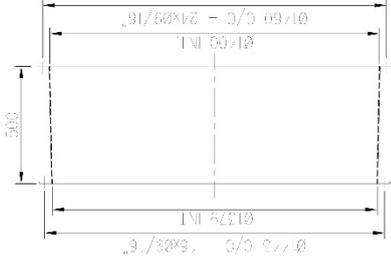
CODO METALICO 90°
 ESC. 1:25
 CANT. 01 UNID



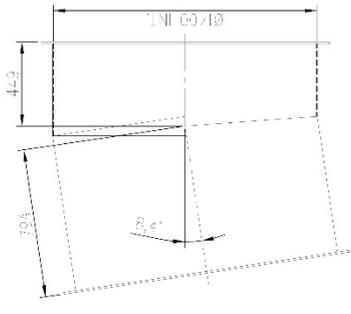
CONEXION TIPO YEE
 ESC. 1:30
 CANT. 01 UNID



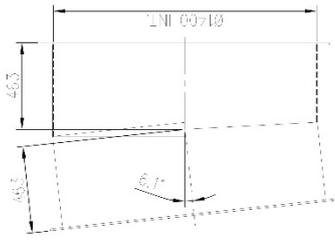
JUNTA FLEXIBLE
 ESC. 1:20
 CANT. 16 UNID



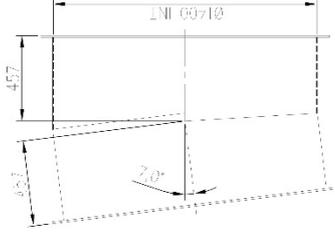
ADAPTADOR DE VENTILADOR
 ESC. 1:20
 CANT. 04 UNID



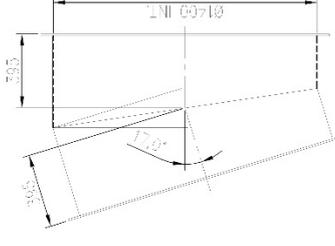
ADAPTADOR N°1
 ESC. 1:25
 CANT. 01 UNID



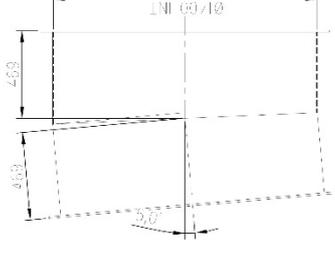
ADAPTADOR N°2
 ESC. 1:25
 CANT. 01 UNID



ADAPTADOR N°3
 ESC. 1:25
 CANT. 02 UNID



ADAPTADOR N°4
 ESC. 1:25
 CANT. 20 UNID



ADAPTADOR N°5
 ESC. 1:25
 CANT. 01 UNID

SwedVent Flexible Ducting - Technical specification

General: All seams and other joining works are fully welded (vulcanised) 40 mm wide. No sewing. Suspension hooks are welded to the fabric at a distance of c/c 0,75 m. On duct diameters >Ø1800 mm, two parallel lines of suspension hooks are mounted. **Coupling A - SwedVent**

ZIP-joints: Both duct ends made with a split zipper (plastic zipper) of heavy duty PVC-type. **Protection-sleeve** which on the outside hides the zipper and on the inside seals the joint according to the principle "the higher pressure the tighter joint". With ZIP-joints, the ducting is delivered on standard pallets regardless diameter. **Coupling B - SwedVent steel clamps:** One end of each duct length is fitted with a steel ring, vulcanised to the fabric. One steel clamp made of galvanized 1,5 mm steel with locking device (threaded crank) closes the joint.

Every duct length is marked with information regarding quality, length, diameter, max allowed working pressure and manufacturing date.

* "RS" stands for Rip-Stop. The base fabric is made with an enhanced yarn which dramatically increases the tear strength. This feature eliminates the ducting to further-tear longitudinally under normal conditions.		Titan FR-RSX* (yellow)	Airolite FR-RSX* (yellow)	Titan FRA-RSX* (black)	Airolite FRA-RSX* (black)
		Polyester			
Base fabric		Polyester			
Yarn thickness (dtex)		2200/1430	3300/1100	2200/1100	3300/1100
Yarns/cm	warp	3,5 (x1430)	3,5	3,5 (x1430)	3,5
	weft	3,5 (x2200)	3,5+1	3,5 (x2200)	3,5+1
Coating		Plastisized PVC			
Tensile strength (N/5 cm) (DIN 53354)	warp	2400	1400	2400	1400
	weft	3000	1700	3000	1700
Tear strength (N) (DIN 53363)	warp	550	270	550	270
	weft	750	340	750	340
Total weight (gram/m2) (DIN 53352)		600	500	600	500
Flame resistance (DIN4102-B1)		yes			
Cold crack (DIN 53361)		-30°C			
Environmental resistance		Resistant against rotting, humus acid, diesel- and nitrous gases, UV-light			
Conductivity (ISO 284)		-----	-----	1x10 ⁶ Ω	1x10 ⁶ Ω

Diameter (mm)	Max allowed working pressures (kPa) valid for new ducting. Safety factor 3.	Titan FR-RSX* (yellow)	Airolite FR-RSX* (yellow)	Titan FRA-RSX* (black)	Airolite FRA-RSX* (black)
400		98,0	64,4	98,0	64,4
500		78,4	51,5	78,4	51,5
600		65,3	42,9	65,3	42,9
700		56,0	36,8	56,0	36,8
800		49,0	32,2	49,0	32,2
900		43,6	28,6	43,6	28,6
1000		39,2	25,8	39,2	25,8
1100		35,6	23,5	35,6	23,5
1200		32,7	21,5	32,7	21,5
1300		30,2	19,8	30,2	19,8
1400		28,0	18,4	28,0	18,4
1500		26,1	17,1	26,1	17,1
1600		24,5	16,1	24,5	16,1
1700		23,1	15,2	23,1	15,2
1800		21,8	14,3	21,8	14,3
2000		19,6	12,9	19,6	12,9
2200		17,8	11,7	17,8	11,7
2400		16,3	10,7	16,3	10,7
2500		15,7	10,4	15,7	10,4
2600	15,1	9,9	15,1	9,9	
2800	14,0	9,2	14,0	9,2	
3000	13,1	8,6	13,1	8,6	

Note: All specifications are subject to changes without notification.