

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**



**Mejoramiento del sistema de aire comprimido para optimizar la perforación  
en operaciones en unidad minera Huachocolpa - Huancavelica 2024**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Concha Marquez, Yuri Jimmy**

**ORCID: 0009-0004-5872-9985**

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

**Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio**

**ORCID: 0000-0002-4761-8911**

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA DE MINAS**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 03 de Diciembre del 2025

**Dictamen: 015652-C-EPIM-2025**

Visto el borrador del expediente 015652, presentado por:

**2017205281 - CONCHA MARQUEZ YURI JIMMY**

Titulado:

**MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA OPTIMIZAR LA PERFORACIÓN EN OPERACIONES EN UNIDAD MINERA HUACHOCOLPA - HUANCABELICA 2024**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO DE MINAS**

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO  
DICTAMINADOR**



**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK  
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY  
DICTAMINADOR**



# Mejoramiento del sistema de aire comprimido para optimizar la perforación en operaciones en unidad minera Huachocolpa - Huancavelica 2024

## INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
3	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	2%
4	<a href="https://alicia.concytec.gob.pe">alicia.concytec.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	1%

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis, primeramente, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada obstáculo en el camino, y por bendecirme con una familia unida.*

*A mis padres, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por ser mi ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y humildad, y por enseñarme que todo logro requiere dedicación y sacrificio. A mi padre darle las gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por impulsarme a dar siempre lo mejor de mí, tanto en el ámbito profesional como en el personal.*



## AGRADECIMIENTOS

*Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, mi alma mater, por haberme brindado la oportunidad de formarme profesional y personalmente en sus aulas. Durante estos años, he podido desarrollar no solo conocimientos técnicos, sino también valores éticos y humanos que llevaré conmigo a lo largo de mi vida profesional.*

*Agradezco profundamente a toda la plana docente de la Escuela Profesional de Minas, por compartir con generosidad su experiencia, sabiduría y compromiso con la excelencia académica. Cada uno de ellos ha dejado una huella significativa en mi formación, inspirándome a seguir aprendiendo y mejorando constantemente.*

*De manera especial, extiendo mi gratitud al Ingeniero Omar Paredes, por sus valiosas enseñanzas académicas y por los consejos sabios que supo transmitirme. Su guía y ejemplo profesional han sido un pilar importante en mi desarrollo como futuro ingeniero.*

*Asimismo, deseo agradecer a mi tutor de tesis, por su apoyo constante, orientación durante el proceso de mi tesis. Su acompañamiento fue fundamental para culminar con éxito este proyecto académico.*

*Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a esta etapa tan importante de mi vida universitaria. A todos ustedes, mi más sincero reconocimiento y gratitud.*

## EPÍGRAFE

*"La determinación de un solo paso es más valiosa que el éxito de una carrera terminada.  
Por la lección que transforma cada desafío en una oportunidad."*



## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo mejorar el sistema de aire comprimido para optimizar la perforación en la Unidad Minera Huachocolpa, ubicada en Huancavelica. El estudio parte de la problemática identificada en la operación, donde el consumo total requerido asciende a 3,131.7 CFM, mientras que la capacidad real del sistema solo alcanza 2,326 CFM, generando un déficit de 805.7 CFM que afecta directamente el rendimiento de los equipos de perforación y disminuye la productividad de la mina.

Metodológicamente, se realizó una evaluación del sistema actual, utilizando análisis documental, mediciones directas, inspecciones en campo y un modelamiento técnico de la red de distribución. Se estudiaron parámetros esenciales como la presión en los puntos críticos, el caudal ajustado por simultaneidad, las pérdidas por fricción, el inventario de tuberías y el comportamiento del flujo en accesorios. Se evidenciaron caídas de presión superiores a 20 PSI, ocasionadas por diámetros insuficientes, excesiva cantidad de tees y codos, tuberías deterioradas y fugas considerables en la red.

Como propuesta de optimización, se rediseñó el circuito con tuberías HDPE PN16 de 6", 4" y 3", reduciendo longitudes equivalentes y minimizando turbulencias internas. La red optimizada elevó la presión operativa en frentes de trabajo a valores entre 88 y 92 PSI, disminuyó la caída de presión a rangos de 6–8 PSI, recuperó la estabilidad de la red y aseguró un caudal total de 3,180 CFM, adecuado para la demanda operacional. Estos cambios permitieron mejorar la eficiencia de perforación, reducir tiempos muertos, disminuir el consumo energético entre 12% y 18% y garantizar la confiabilidad del sistema neumático para futuras expansiones.

Los resultados demuestran que la optimización del sistema de aire comprimido no solo soluciona las limitaciones actuales, sino que contribuye a un incremento significativo de la productividad minera y una reducción de costos operativos.

**Palabras clave:** Aire comprimido, Perforación, Optimización, Caída de presión



## ABSTRACT

The present research aims to improve the compressed air system in order to optimize drilling operations at the Huachocolpa Mining Unit, located in Huancavelica. The study begins with the operational issue identified: the total required air consumption reaches 3,131.7 CFM, while the actual capacity of the system is only 2,326 CFM, generating a deficit of 805.7 CFM that directly affects the performance of drilling equipment and reduces the mine's productivity.

Methodologically, an evaluation of the current system was carried out using documentary analysis, direct measurements, field inspections, and a technical modeling of the distribution network. Essential parameters such as pressure at critical points, flow adjusted by simultaneity, friction losses, pipe inventory, and flow behavior in accessories were examined. Pressure drops exceeding 20 PSI were identified, caused by insufficient pipe diameters, excessive tees and elbows, deteriorated pipelines, and significant air leaks in the network.

As an optimization proposal, the circuit was redesigned using 6", 4", and 3" HDPE PN16 pipes, reducing equivalent lengths and minimizing internal turbulence. The optimized network increased operational pressure at work fronts to values between 88 and 92 PSI, reduced pressure drops to ranges of 6–8 PSI, restored network stability, and ensured a total flow of 3,180 CFM, suitable for operational demand. These improvements enhanced drilling efficiency, reduced downtime, decreased energy consumption by 12% to 18%, and strengthened the reliability of the pneumatic system for future expansions.

The results demonstrate that optimizing the compressed air system not only resolves current limitations, but also contributes to a significant increase in mining productivity and a reduction in operational costs.

**Keywords:** Compressed air, Drilling, Optimization, Pressure drop



## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN ..... 1

CAPÍTULO I..... 4

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA TEÓRICO ..... 5

1.1 Determinación del problema ..... 5

1.2 Objetivos del proyecto ..... 6

1.2.1 Objetivo general ..... 6

1.2.2 Objetivos específicos..... 6

1.3 Preguntas de investigación ..... 6

1.3.1 Pregunta principal ..... 6

1.3.2 Preguntas específicas..... 6

1.4 Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema..... 7

1.5 Palabras clave ..... 7

1.6 Justificación e importancia..... 7

CAPÍTULO II ..... 9

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS ..... 10

2.1 Estado del arte ..... 10

2.1.1 Antecedentes de la investigación ..... 10

2.2 Bases teóricas de la investigación ..... 12

2.2.1 Aire comprimido ..... 12

2.2.2	Presión absoluta.....	13
2.2.3	Presión atmosférica .....	13
2.2.4	Presión manométrica .....	14
2.2.5	Temperatura.....	14
2.2.6	Rendimiento en función de la presión.....	14
2.2.7	Relación de compresión .....	15
2.2.8	Etapas de compresión.....	15
2.2.9	Compresoras.....	17
2.2.10	Compresores de tornillo .....	18
2.2.11	La altura en el rendimiento de la compresora .....	18
2.2.12	Instalación de compresoras .....	19
2.2.13	Capacidad efectiva del compresor.....	20
	Depósitos de aire.....	20
2.2.14	Volumen efectivo de los depósitos de aire comprimido.....	21
2.2.15	Red de distribución.....	22
2.2.16	Condiciones de instalación del sistema de aire comprimido.....	23
2.2.17	Presión atmosférica a una altitud determinada.....	24
2.2.18	Factor de corrección por la altura.....	24
2.2.19	Consumo real para máquinas neumáticas .....	24
2.2.20	Caída de presión en tuberías.....	25
2.2.21	Caída de presión por fricción .....	26
2.2.22	Cálculo de la caída de presión.....	26
2.2.23	Fugas de aire comprimido .....	27
2.2.24	Flujos con restricción gradual .....	27
2.2.25	Flujos en cambio de dirección.....	28

2.2.26	Tuberías de aire comprimido.....	29
2.2.27	Hipótesis de consumo.....	29
2.2.28	Ventilación auxiliar .....	30
2.2.29	Cantidad de aire necesario.....	31
2.2.30	Métodos de ventilación auxiliar .....	31
2.2.31	Ductos.....	32
2.2.32	Clases de ductos o mangas utilizados en la ventilación .....	32
2.2.33	Ventiladores para minas subterráneas .....	35
2.2.34	Clasificación de ventiladores .....	36
2.3	Hipótesis.....	40
2.4	Variables .....	40
2.4.1	Variable dependiente .....	40
2.4.2	Variable independiente .....	40
CAPÍTULO III .....		42
3	MARCO METODOLÓGICO.....	43
3.1	Alcances y limitaciones.....	43
3.1.1	Alcances de la investigación .....	43
3.1.2	Limitaciones de la investigación .....	44
3.2	Tipo y nivel de investigación .....	44
3.2.1	Tipo de investigación .....	44
3.2.2	Nivel de investigación.....	44
3.3	Población y muestra o universo .....	45
3.3.1	Población.....	45
3.3.2	Muestra.....	45
3.4	Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	46

3.4.1	Técnicas de recolección de datos .....	46
3.4.2	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
3.4.3	Plan de análisis estadístico de los datos .....	47
3.5	Lugar de desarrollo de investigación .....	48
3.6	Caracterización del sistema actual de aire comprimido .....	50
3.7	Análisis de presión y caudal en la red actual .....	51
3.8	Análisis de caudal y simultaneidad .....	52
3.9	Análisis de pérdidas por fricción y accesorios .....	53
3.9.1	Longitudes equivalentes utilizadas.....	53
3.10	Evaluación energética del sistema actual .....	54
CAPÍTULO IV .....		58
4	Comparación antes y después de la optimización.....	59
4.1	Impacto operativo de la optimización .....	60
4.2	CONCLUSIONES .....	61
4.3	RECOMENDACIONES .....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		64
ANEXOS.....		65

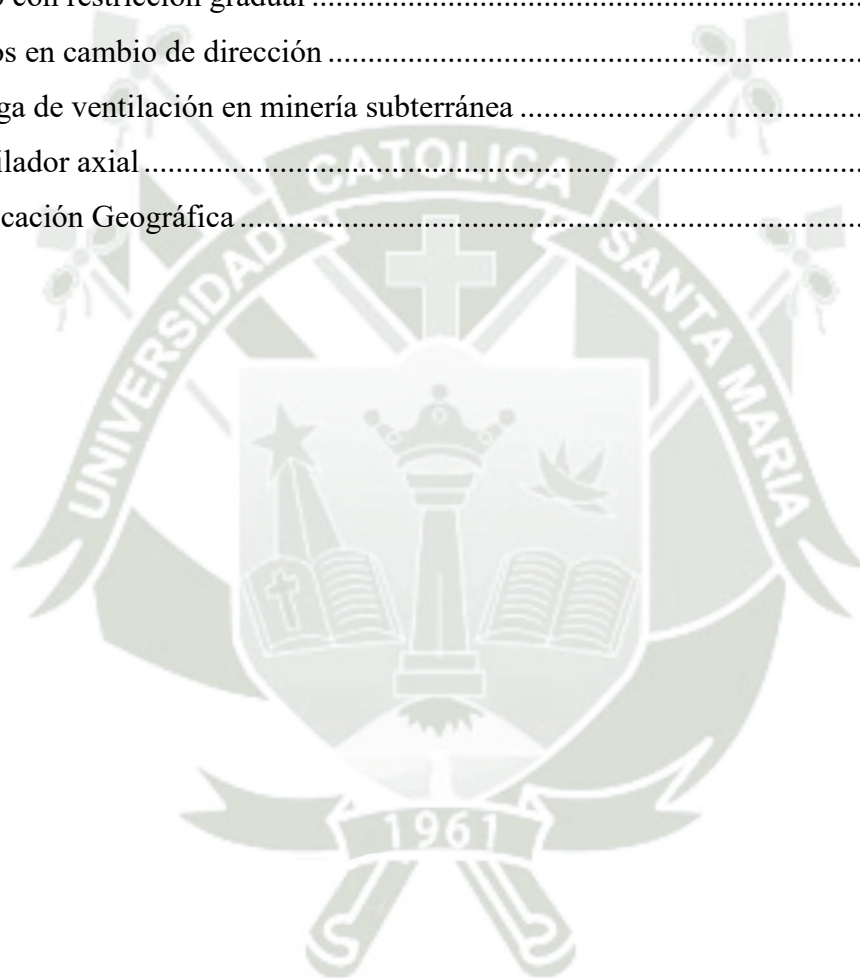
## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Presión atmosférica para diferentes altitudes .....	19
<b>Tabla 2</b> Optimización de variables .....	41
<b>Tabla 3</b> Presiones registradas en puntos críticos de la red (PSI) .....	51
<b>Tabla 4</b> Consumo real ajustado por simultaneidad.....	52
<b>Tabla 5</b> Longitud equivalente del sistema actual.....	54
<b>Tabla 6</b> Consumo energético registrado (kWh).....	55
<b>Tabla 7</b> Propuesta de red optimizada.....	56
<b>Tabla 8</b> Comparación técnica del sistema antes/después.....	59



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Curva de rendimiento en función a la presión .....	15
<b>Figura 2</b> Etapas de compresión .....	16
<b>Figura 3</b> Tipos de compresoras .....	17
<b>Figura 4</b> Volumen efectivo del depósito de aire .....	22
<b>Figura 5</b> Acople de red de distribución de aire .....	23
<b>Figura 6</b> Flujo con restricción gradual .....	28
<b>Figura 7</b> Flujos en cambio de dirección .....	29
<b>Figura 8</b> Manga de ventilación en minería subterránea .....	34
<b>Figura 9</b> Ventilador axial .....	39
<b>Figura 10</b> Ubicación Geográfica .....	49



## INTRODUCCIÓN

La tesis presenta la problemática del sistema de aire comprimido en la Unidad Minera Huachocolpa, una operación subterránea que utiliza energía neumática para la perforación, sostenimiento, limpieza y operación de equipos auxiliares. El documento señala que, debido al crecimiento de frentes de trabajo y al incremento de la demanda operativa, el sistema existente presenta un déficit de 805.7 CFM, lo que genera caídas de presión, baja eficiencia de perforación, retrasos en la producción y mayor consumo energético. La introducción destaca la importancia de optimizar el sistema para mejorar el rendimiento operativo y reducir costos.

En el Capítulo I, correspondiente al planteamiento del problema teórico, se describe la situación actual del sistema de aire comprimido en la Unidad Minera Huachocolpa. El capítulo expone que el incremento de labores activas y la expansión productiva han generado un desbalance entre la demanda y la capacidad instalada, evidenciándose un déficit de 805.7 CFM respecto al consumo total requerido. Esta insuficiencia produce caídas de presión, disminución del rendimiento de los equipos de perforación y retrasos en el ciclo operacional. Asimismo, se formulan el objetivo general y los objetivos específicos orientados a proponer un circuito optimizado, minimizar pérdidas de presión y controlar fugas. El capítulo también presenta las preguntas de investigación, la justificación técnica y la relevancia operativa del estudio, destacando que un sistema de aire comprimido eficiente es fundamental para el proceso perforación–voladura.

En el Capítulo II, se desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación. Se abordan conceptos esenciales sobre aire comprimido, presión, temperatura, caudal, rendimiento, fricción, simultaneidad, comportamiento del flujo en tuberías y accesorios, así como fundamentos del

funcionamiento de compresoras y depósitos de aire. También se incluyen teorías relacionadas con caídas de presión, longitudes equivalentes, eficiencia de transmisión neumática y parámetros operativos críticos en minería subterránea. Además, se presentan antecedentes y estudios previos que respaldan la necesidad de mejorar la red neumática, y se definen las hipótesis y variables de investigación (independiente: mejoramiento del sistema; dependiente: reducción de pérdidas de presión).

En el Capítulo III, se expone el marco metodológico empleado para evaluar el sistema. La investigación se clasifica como aplicada, comparativa, explicativa y experimental, dado que combina análisis documental con trabajos de campo, mediciones directas, modelamiento técnico y simulaciones operativas. Se detallan la población y muestra, los instrumentos de medición utilizados (manómetros, caudalímetros, pinzas amperimétricas, software), y las técnicas de recolección de datos. Asimismo, se presenta un plan de análisis estadístico que considera el comportamiento del caudal, la simultaneidad, la presión, los niveles de eficiencia y su variabilidad antes y después de la optimización propuesta.

En el Capítulo IV, se muestran los resultados del análisis técnico de la red de aire comprimido. Se identifica que la red actual, compuesta por tuberías metálicas y HDPE, accesorios de alto rozamiento y diámetros insuficientes, genera pérdidas de presión mayores a 20 PSI, afectando la operación de perforadoras Jackleg y Stopers. El caudal efectivo, ajustado por simultaneidad, confirma que la capacidad instalada (2,326 CFM) no cubre la demanda real (3,131.7 CFM). Se evalúan también las pérdidas por fricción, la longitud equivalente y la turbulencia generada por accesorios inadecuados. El análisis energético evidencia que los compresores operan con sobrecarga, incrementando el consumo entre 12% y 18%. La optimización propuesta, basada en tuberías HDPE PN16 de 6", 4" y 3", reduce significativamente las caídas de

presión a rangos de 6–8 PSI y eleva la presión en frentes críticos a valores entre 88 y 92 PSI, además de aumentar el caudal total a 3,180 CFM. Esta mejora incrementa la eficiencia de perforación aproximadamente en 40%, reduce tiempos muertos y disminuye el desgaste de equipos. Finalmente, en el Capítulo V, se presentan conclusiones que indican que la optimización del sistema de aire comprimido cumple con los objetivos planteados, mejorando la estabilidad operativa, el rendimiento de los equipos neumáticos y la productividad general de la mina. Las recomendaciones incluyen implementar completamente la red optimizada, realizar monitoreo periódico de fugas y presiones, mantener actualizado el inventario de tuberías y considerar futuras expansiones mediante la evaluación periódica de simultaneidad y consumo.





# CAPÍTULO I

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA TEÓRICO

### 1.1 Determinación del problema

Conforme las actividades de extracción mineral progresan en una operación minera, se vuelve cada vez más crucial abordar las limitaciones existentes en el sistema de aire comprimido.

La necesidad de implementar mejoras, llevar a cabo evaluaciones exhaustivas y optimizar integralmente este sistema se hace evidente debido a los problemas recurrentes de presiones insuficientes y a una distribución ineficiente de la red de tuberías a lo largo de la mina.

Superar estos desafíos es fundamental para poder implementar soluciones específicas y a la medida que permitan un avance más eficiente y productivo de las diversas tareas de producción y desarrollo minero que dependen directamente del suministro de aire comprimido.

En la unidad minera Huachocolpa se ubica dentro del rango la mediana minería, con un consumo de aire comprimido de 3,131.7 CFM, pero que actualmente logra 2,326.0 lo cual nos da un déficit de 805.7 que debemos solucionar, para lo cual se plantea una propuesta de una nueva red de distribución de aire comprimido.

## 1.2 Objetivos del proyecto

### 1.2.1 *Objetivo general*

Mejorar el sistema de aire comprimido para optimizar la perforación en operaciones mineras en unidad minera Huachocolpa – Huancavelica 2024

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- Proponer un circuito de aire comprimido que satisfaga los requerimientos de consumo de las máquinas de perforación.
- Minimizar las caídas de presión que se presentan en los tramos de las labores por los cambios de dirección y el uso de accesorios.
- Controlar las fugas de aire que se presenten en el sistema de la red de distribución de aire comprimido.

## 1.3 Preguntas de investigación

### 1.3.1 *Pregunta principal*

¿Cómo se puede mejorar el sistema de aire comprimido para optimizar la perforación en operaciones en la unidad minera Huachocolpa?

### 1.3.2 *Preguntas específicas*

- ¿El circuito de aire comprimido satisface los requerimientos de consumo de las máquinas de perforación en la unidad minera Huachocolpa?
- ¿Cómo se puede lograr el aumento de distribución de aire comprimido con los actuales compresores de la unidad minera Huachocolpa?

- ¿Cómo se puede minimizar la caída de presión que ocurre por las longitudes de tuberías, cambios de dirección de la red de tuberías y la presencia de accesorios?

#### **1.4 Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema**

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a “Optimización de procesos mineros” ya que busca optimizar el sistema de aire comprimido en la unidad minera Huachocolpa.

#### **1.5 Palabras clave**

- Minería
- Aire comprimido
- Perforación
- Voladura
- Circuito de aire

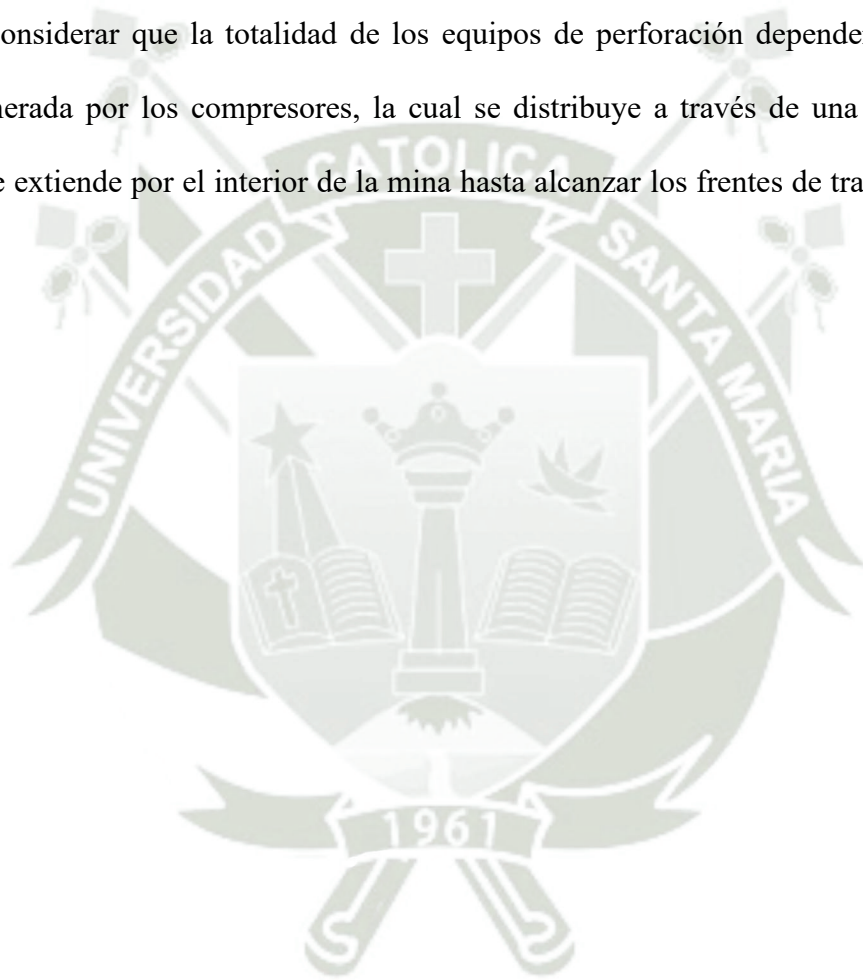
#### **1.6 Justificación e importancia**

El avance constante de la tecnología en la ingeniería de minas está impulsando la optimización de diversos sistemas empleados en las operaciones subterráneas, lo que se traduce en un aumento de la producción y una mejora significativa de la seguridad.

En este contexto, la evaluación y optimización del sistema de aire comprimido emerge como una necesidad identificada por el departamento de mina, en estrecha colaboración con el personal operativo encargado de las tareas de perforación. La información recopilada y los datos obtenidos sugieren fuertemente la urgencia de realizar un análisis exhaustivo y una optimización

integral del sistema de aire comprimido, principalmente debido a las presiones de operación insuficientes y a la ineficiente distribución de la red de tuberías que recorre la mina.

La presente investigación busca destacar la relevancia crítica del aire comprimido y su eficiente transmisión como factores clave para incrementar la producción minera y, por consiguiente, para reducir los costos asociados a la generación y utilización de esta energía. Es fundamental considerar que la totalidad de los equipos de perforación dependen de la energía neumática generada por los compresores, la cual se distribuye a través de una extensa red de tuberías que se extiende por el interior de la mina hasta alcanzar los frentes de trabajo y las áreas de desarrollo.





## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Estado del arte

#### 2.1.1 *Antecedentes de la investigación*

En la tesis titulada “Diseño, calculo y evaluación del sistema de red de aire comprimido en minas subterráneas” El aire comprimido es fundamental para la minería, siendo vital para diversas operaciones como fuente de energía, transporte, insumo de procesos y transmisión de señales. Su suministro debe ser confiable, manteniendo la presión, cantidad y calidad adecuadas en todo momento, ya que muchas tareas críticas en la mina dependen directamente de él.

Esta tesis se enfoca en evaluar técnica y económicamente el sistema de aire comprimido en una mina subterránea. Identifica problemas clave como el déficit de aire y la baja presión, atribuyéndolos a la capacidad insuficiente de los compresores y a una distribución deficiente por el diámetro incorrecto de las tuberías, lo que impide una presión adecuada en los frentes de trabajo. La investigación subraya cómo un sistema de aire comprimido eficiente y su correcta transmisión son cruciales para aumentar la producción y reducir costos, especialmente porque los equipos de perforación dependen de la fuerza neumática.

La investigación nos dice que la pérdida de presión en aire comprimido genera una pérdida económica, ya que su investigación señala la pérdida de 980 PCM y que el costo por PCM es 0.124 Kw y esto da una pérdida de 121.5 Kw que convertido a dólares es una pérdida de US\$ 729, esto demuestra que nuestra investigación en la mina Huachocolpa sobre una nueva red de distribución de aire comprimido le permitirá el ahorro de dinero por una mejor distribución de aire comprimido. (Aedo, 2013)

En la tesis titulada “Diseño del sistema de distribución de aire comprimido para la reducción de costos – caso de estudio pequeña minería de oro en la ciudad de Arequipa” se indica que el aire comprimido es esencial en la industria, incluida la minería, y su importancia es tal que en algunos países se considera el cuarto servicio fundamental, junto con la electricidad, el agua y el gas. La industria minera busca constantemente reducir costos y optimizar el uso del espacio y la energía.

Esta investigación se centró en la pequeña minería aurífera de Arequipa con el objetivo principal de diseñar un sistema de aire comprimido eficiente. Para ello, se calcularon y analizaron varios parámetros, desde la sala de compresores hasta los frentes de trabajo. El estudio busca seleccionar los compresores adecuados y analizar los costos actuales para encontrar formas de reducirlos.

La metodología descriptiva del estudio busca identificar los factores que elevan los costos y proponer soluciones mediante un nuevo diseño del sistema de distribución de aire comprimido. La premisa es que si el sistema actual genera altos costos, un diseño mejorado logrará reducirlos significativamente.

El estudio comenzó con un diagnóstico de las instalaciones existentes, que reveló varias deficiencias. Luego se recopilaron datos y se procedió a diseñar un nuevo sistema de distribución de aire comprimido.

El análisis del diseño propuesto para la sala de compresores muestra que las pérdidas de presión en los frentes de trabajo son mínimas, lo que se traduce en una reducción de costos a mediano plazo. Esto se debe a que el sistema suministra el caudal de aire a la presión exacta que requieren los equipos.

Es crucial controlar los costos del aire comprimido. Las pérdidas actuales representan cifras elevadas, lo que justifica la inversión en un nuevo diseño de sala de compresores. El objetivo final de estos análisis no es solo evidenciar los altos costos, sino justificar la importancia de invertir a corto plazo para obtener mayores ganancias y tomar mejores decisiones a futuro. (Bejarano, 2022)

## **2.2 Bases teóricas de la investigación**

### **2.2.1 Aire comprimido**

El aire comprimido es aquel que ha sido sometido a una presión mayor que la atmosférica y cuyo volumen se ha reducido; al liberarse o expandirse, es capaz de producir trabajo mecánico. Este proceso de compresión se lleva a cabo mediante equipos como compresores.

Cuando se emplea el aire comprimido como fuente de energía dentro de un proceso industrial, el objetivo principal es obtener trabajo útil, entendido como la aplicación de una fuerza a lo largo de una distancia. En este contexto, el rendimiento del aire comprimido depende directamente de la masa o el peso del aire que participa en la generación de esa fuerza.

En la industria minera, el aire comprimido tiene un papel esencial. Se utiliza para accionar equipos neumáticos manuales, para mezclar y atomizar materiales durante la proyección de partículas finas como en el proceso de shotcrete, y para operar tolvas neumáticas, winches, bombas, entre otros equipos. Gracias a su versatilidad, seguridad y facilidad de transporte, el aire comprimido continúa siendo una de las formas de energía más empleadas y confiables dentro de las operaciones mineras. (Maquera & Eloy, 2008)

### 2.2.2 Presión absoluta

Se entiende como presión absoluta como la suma de la presión atmosférica mas la presión que marca un manómetro.

$$P_{Absoluta} = P_{manométrica} + P_{atmosférica}$$

Esto significa que la presión absoluta incluye tanto la presión ejercida por el sistema como la presión atmosférica que siempre está presente alrededor de nosotros.

### 2.2.3 Presión atmosférica

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el aire en todas las direcciones. Al nivel del mar, esta presión equivale al peso de una columna de agua de 10 metros de altura, lo que corresponde aproximadamente a 1.033 kg/cm<sup>2</sup>, 14.69 lb/in<sup>2</sup>, 760 mm de Hg o 29.92 pulgadas de Hg, considerando una temperatura de 0 °C (32 °F). Fórmula empleada es:

$$\text{Log}(P_2) = \text{Log}(P_1) - \pm [(+ o -) h / 122.4(Th + 461)]$$

Donde:

- $P_2$ : Presión atmosférica a la altura  $h$  (PSI)
- $P_1$ : presión atmosférica a nivel del mar (14.69)
- $h$ : Diferencia de altura (en pies)
- $Th$ : temperatura absoluta (en °F + 461 para convertir a Rankine)
- $(+ o -)$ : El  $\pm$  depende de si subes (+) o bajas (-) en altitud

#### 2.2.4 *Presión manométrica*

Es la presión de funcionamiento que registra el manómetro y que se encuentra por encima de la presión atmosférica. Dentro de ella se distinguen una presión de estanqueidad y una presión dinámica.

#### 2.2.5 *Temperatura*

La temperatura representa la cantidad de calor presente en un sistema. Para medirla se utilizan diferentes escalas, entre ellas:

- **Centígrada o Celsius (°C):** donde 100° indica el punto de ebullición del agua y 0° corresponde al punto de fusión del hielo.
- **Fahrenheit (°F):** en la cual 212° marca la ebullición del agua y 32° el punto de congelación.

Para convertir entre estas escalas se emplean las siguientes relaciones:

- De °F a °C:  $T^{\circ}\text{C} = 5/9 (T^{\circ}\text{F} - 32)$
- De °C a °F:  $T^{\circ}\text{F} = 9/5 (T^{\circ}\text{C} + 32)$

Para obtener temperaturas absolutas:

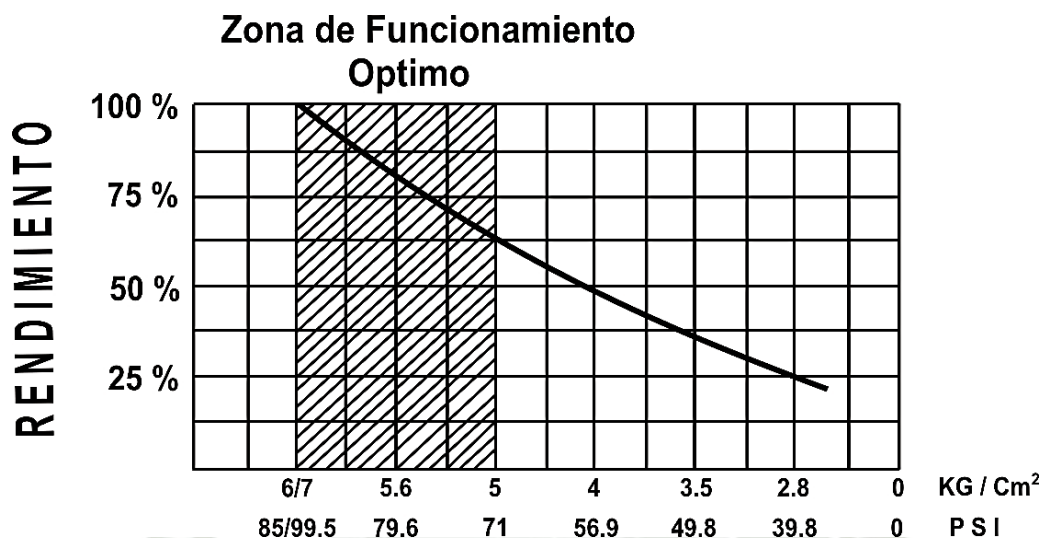
- En Kelvin:  $T^{\circ}\text{K} = T^{\circ}\text{C} + 273$
- En Rankine:  $T^{\circ}\text{R} = T^{\circ}\text{F} + 460$

#### 2.2.6 *Rendimiento en función de la presión*

Para garantizar que la máquina reciba la presión de trabajo necesaria, el compresor debe proporcionar aire comprimido a una presión superior. La diferencia admisible entre la presión del

compresor y la de la máquina varía entre 0.5 y 1.5 bar, debido a las pérdidas que ocurren en las instalaciones por el rozamiento del aire al desplazarse a cierta velocidad. Si se emplean tuberías de mayor diámetro, dichas pérdidas de presión disminuyen.

**Figura 1**  
*Curva de rendimiento en función a la presión*



Nota: Curva de funcionamiento optimo. (Maquera & Eloy, 2008)

### 2.2.7 *Relación de compresión*

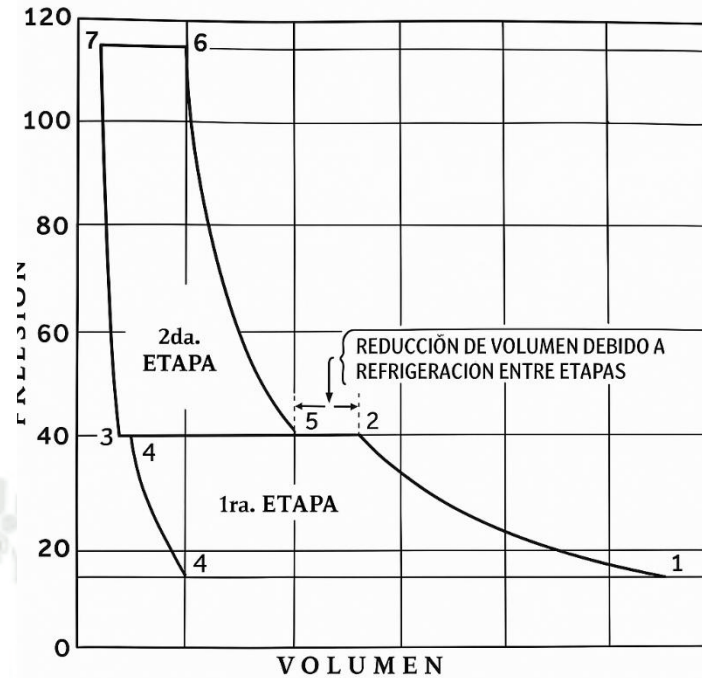
Es el resultado de dividir la presión absoluta de salida entre la presión absoluta de entrada.

### 2.2.8 *Etapas de compresión*

Según los principios de la termodinámica, el trabajo necesario para comprimir un gas aumenta conforme se eleva su temperatura. Por ello, para controlar dicho incremento térmico y optimizar el desempeño del proceso, la compresión suele efectuarse en varias etapas, refrigerando el gas entre cada una de ellas.

La compresión escalonada mejora el rendimiento volumétrico y reduce la relación de compresión en la primera etapa.

**Figura 2**  
*Etapas de compresión*



Nota: presión vs volumen. (Maquera & Eloy, 2008)

La opción más adecuada para la refrigeración intermedia es el enfriamiento por aire, el cual resulta ideal cuando la temperatura del enfriador coincide con la temperatura del aire aspirado en la primera etapa, aunque alcanzar esta condición suele ser bastante complicado. Además, el consumo de energía sería muy bajo si todas las etapas trabajaran con la misma relación de compresión. Para cada rango de presión existe un número óptimo de etapas, y la compresión en varias fases ofrece las siguientes ventajas:

- Permite aproximarse lo más posible a un proceso isotérmico.
- Gracias a la refrigeración entre etapas, es factible acercarse al comportamiento isotérmico, ya que en una sola etapa, aun con enfriamiento, el proceso seguiría siendo adiabático.

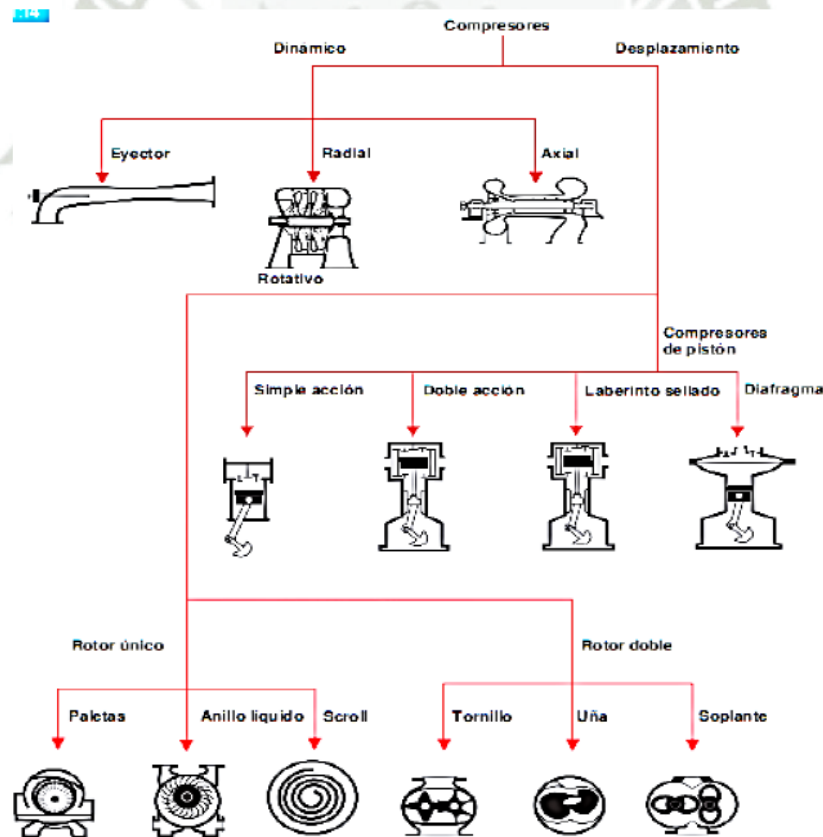
- Se mejora la lubricación.
- Es posible alcanzar presiones elevadas.

La compresión isotérmica ocurre cuando la temperatura permanece constante mientras cambian la presión y el volumen inicial.

### 2.2.9 Compresoras

Son equipos que toman aire del entorno a presión atmosférica y lo comprimen hasta alcanzar una presión mayor, disminuyendo su volumen. Estas máquinas pueden clasificarse de diversas maneras.

**Figura 3**  
*Tipos de compresoras*



Nota: Diagrama tipos de compresoras. (Atlas Copco, 2011)

### ***2.2.10 Compresores de tornillo***

Estos equipos, ampliamente utilizados en minería, están formados por dos rotores entrelazados uno macho y otro hembra alojados dentro de una carcasa hermética dividida en zonas de alta y baja presión. La compresión del aire se produce gracias al giro de estos rotores, los cuales están sincronizados y no llegan a tocarse entre sí ni a rozar la carcasa que los contiene.

El rotor macho posee cuatro lóbulos que, al girar dentro de los seis canales del rotor hembra, atrapan y comprimen el aire de manera progresiva. Durante la compresión, el rotor macho gira 1.5 veces por cada vuelta del rotor hembra. El aire resultante se obtiene en un flujo constante, evitando así las pulsaciones características de los compresores de pistón. (Kaeser Compresores SRL. , 2021)

### ***2.2.11 La altura en el rendimiento de la compresora***

A medida que aumenta la altitud, tanto la presión como la temperatura del ambiente disminuyen, y estos cambios alteran la relación de compresión.

Como consecuencia, se ven afectados el caudal y la potencia de los compresores. En la tabla siguiente se muestra cómo varían los valores de presión en distintos niveles de altura.

**Tabla 1***Presión atmosférica para diferentes altitudes*

<b>Altura (ft)</b>	<b>Presión atmosférica (PSI)</b>
0	14.70
1,000	14.18
2,000	13.67
3,000	13.17
4,000	12.70
5,000	12.23
6,000	11.79
7,000	11.36
8,000	10.94
9,000	10.54
10,000	10.15

Nota: Tabla de presión atmosférica.

### **2.2.12 Instalación de compresoras**

Un compresor suele ser uno de los equipos que más energía consume, y su eficiencia repercute directamente en los costos generales de operación. Por ello, elegir el compresor adecuado exige un análisis detallado, ya que constituye una de las decisiones más relevantes al instalar una nueva planta o ampliar una existente. Entre los aspectos que influyen en la elección de una compresora se encuentran:

- Las necesidades de presión y caudal de aire.
- La cantidad de puntos donde se utilizará el aire comprimido.
- La demanda máxima, mínima y proyectada a futuro.

- El tipo de infraestructura donde se ubicará el compresor, considerando restricciones de espacio, niveles de ruido, capacidad del piso, vibraciones permitidas y costos energéticos.
- Las condiciones ambientales, como temperaturas extremas, nivel de contaminación del aire, altitud, entre otros factores.
- Si la producción de aire será continua o intermitente.
- Los lineamientos para la instalación y el mantenimiento del equipo.

### 2.2.13 Capacidad efectiva del compresor

Para hallar la capacidad de un compresor se usa la siguiente formula:

$$CE = \left(\frac{V}{T}\right) * \left[\frac{(P_2 - P_1)}{P}\right]$$

- $CE$ : Capacidad efectiva del compresor (cfm).
- $V$ : Volumen neto del depósito (ft<sup>3</sup>).
- $T$ : Tiempo requerido para elevar la presión.
- $P_1$ : Presión inicial del depósito (PSI).
- $P_2$ : Presión final del depósito (PSI).
- $P$ : Presión atmosférica del lugar de trabajo.

### Depósitos de aire

También conocidos como calderines, estos recipientes cilíndricos se colocan justo después del compresor y cumplen las siguientes funciones:

- Eliminar las pulsaciones de aire en la línea de distribución.
- Atender las demandas instantáneas de aire.
- Separar el agua y el aceite presentes en el aire comprimido.

#### ***2.2.14 Volumen efectivo de los depósitos de aire comprimido***

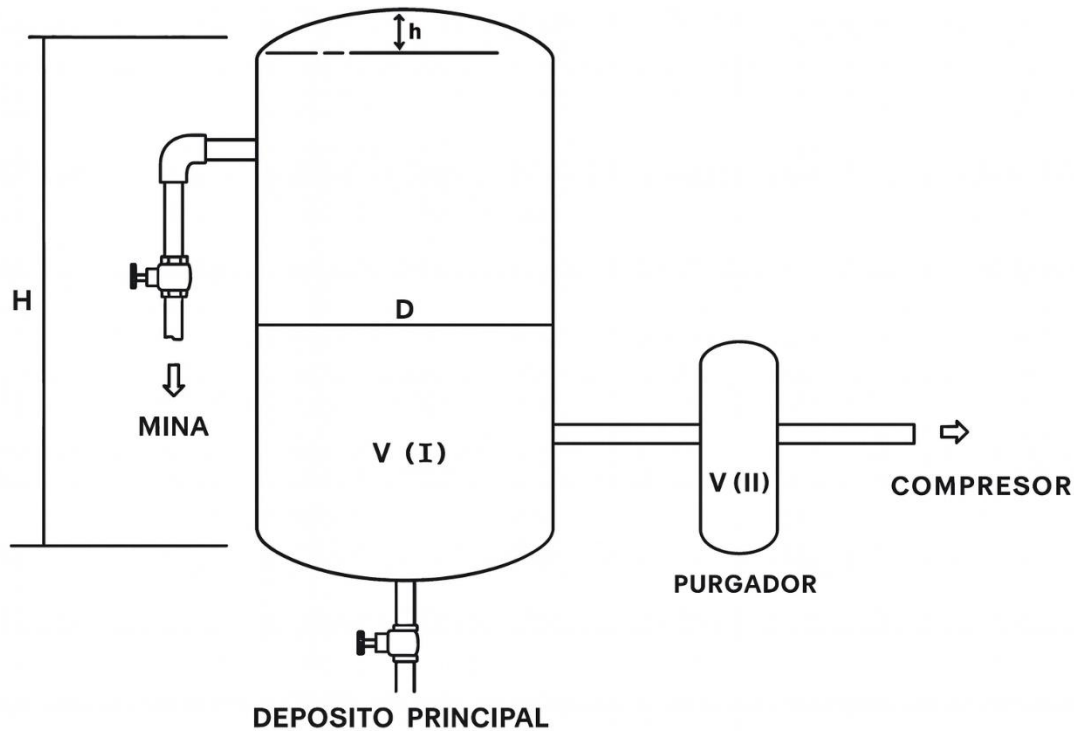
El depósito de aire cumple tres funciones principales:

- Colaborar con el enfriador posterior en la separación del condensado de agua; para mejorar este proceso es posible instalar varios depósitos adicionales.
- Actuar como amortiguador de las pulsaciones del aire comprimido, especialmente en sistemas que utilizan compresores de pistón.
- Servir como reserva de aire comprimido.

Para calcular el volumen útil del compresor, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \left( \pi * D^2 * \frac{H}{4} \right) + 2 * \left[ \left( \frac{\pi * h}{6} \right) * \left( \frac{3}{4} * D^2 + h^2 \right) \right]$$

**Figura 4**  
*Volumen efectivo del depósito de aire*

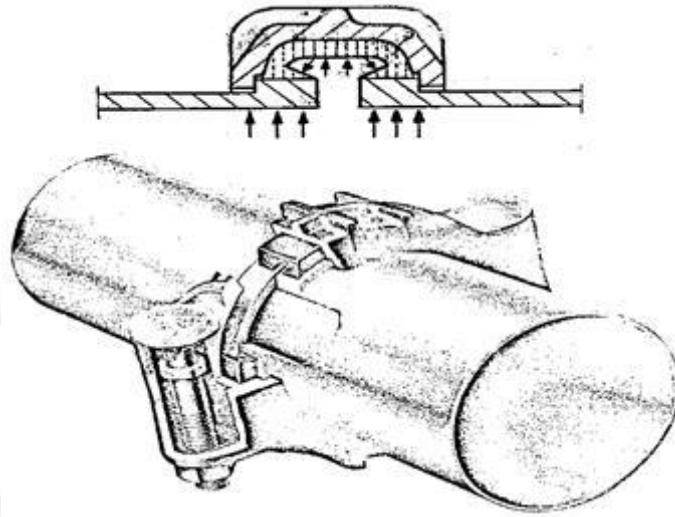


Nota: Grafica de depósito de aire. (Maquera & Eloy, 2008)

### 2.2.15 Red de distribución

Son los componentes que permanecen conectados entre sí; una vez determinado el consumo real de aire comprimido en cada frente de trabajo, se procede al diseño de las instalaciones. El cálculo del consumo de aire se basa en las necesidades futuras previstas y en el requerimiento de los equipos neumáticos. Los parámetros fundamentales a considerar son la presión en el punto de uso, el caudal de aire entregado por el compresor y las pérdidas de presión en el sistema.

**Figura 5**  
*Acople de red de distribución de aire*



Nota: Figura de acople de red de distribución. (Maquera & Eloy, 2008)

### **2.2.16 Condiciones de instalación del sistema de aire comprimido**

Al diseñar una red de aire comprimido, esta debe cumplir tres requisitos fundamentales:

- Mantener la menor pérdida de presión posible.
- Reducir al mínimo las fugas de aire.
- Garantizar que la cantidad de agua presente en la red sea mínima.

Para la instalación de las tuberías de aire comprimido, es necesario considerar:

- El caudal requerido.
- El diámetro adecuado de las tuberías.
- La longitud de los distintos tramos de la red.
- Los accesorios que se utilizarán (codos, derivaciones en T, válvulas, etc.).
- La presión necesaria del aire.

- La pérdida de presión admisible dentro del sistema.

### 2.2.17 Presión atmosférica a una altitud determinada

$$P = P_0 * e^{\frac{-g*H}{R*T}}$$

- $P$ : Presión atmosférica en una altitud determinada (kPa).
- $P_0$ : Presión atmosférica a nivel del mar (100 kPa).
- $g$ : Gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $H$ : Altitud a nivel del mar (m).
- $R$ : Constante universal de los gases (290 J/kg).
- $T$ : temperatura a la altura determinada (°K).

### 2.2.18 Factor de corrección por la altura

$$F = \frac{P_{atm} * (P + P_1)}{P_1 * (P + P_{atm})}$$

- $F$ : factor de corrección.
- $P_{atm}$ : Presión atmosférica a nivel del mar (PSI).
- $P$ : Presión manométrica del aire comprimido en el receptor (PSI).
- $P_1$ : Presión atmosférica a la altura de trabajo.

### 2.2.19 Consumo real para máquinas neumáticas

**a) Requerimiento real**

$$RR = \frac{P + P_1}{P_1}$$

- $RR$ : Requerimiento real.
- $P$ : Presión manométrica del aire comprimido en el receptor (PSI).
- $P_1$ : Presión atmosférica a la altura de trabajo.

**b) Requerimiento de catálogo**

$$RC = \frac{P + P_{atm}}{P_{atm}}$$

- $RC$ : Requerimiento de catálogo
- $P$ : Presión manométrica del aire comprimido en el receptor (PSI).
- $P_{atm}$ : Presión atmosférica a nivel del mar (PSI).

**c) Consumo real para máquinas neumáticas**

$$\text{Consumo real} = \frac{\text{Consumo de catálogo} * \text{Requerimiento real}}{\text{Requerimiento de catálogo}}$$

**2.2.20 Caída de presión en tuberías**

Una reducción de presión implica que en los puntos donde se utiliza el aire comprimido la presión es menor que la existente en la sala de compresores, lo que provoca una disminución en el rendimiento de las máquinas. Por esta razón, la red debe diseñarse de forma que un aumento futuro en la demanda de aire no genere caídas de presión significativas.

La pérdida de presión en las tuberías ocurre únicamente cuando el aire está circulando; si el flujo se detiene, dicha caída desaparece y los tres manómetros registran el mismo valor de presión.

Si en el circuito mostrado se retira el tapón del extremo derecho, comenzarán a generarse pérdidas de presión como resultado del movimiento del aire. Cuanto mayor sea la longitud de la tubería y mayor sea el número de restricciones, más elevadas serán dichas pérdidas.

Al eliminar las restricciones, gran parte de la caída de presión disminuye. En un sistema correctamente diseñado, la pérdida natural de presión a lo largo de tuberías y válvulas es mínima.

### ***2.2.21 Caída de presión por fricción***

La pérdida de presión, también llamada caída de carga se produce cuando el aire comprimido circula y se encuentra con distintos obstáculos como válvulas, codos, derivaciones en T, reducciones y otros accesorios mientras avanza hacia los puntos donde será utilizado.

Para facilitar los cálculos, es común expresar estos accesorios como una longitud equivalente de tubería nominal con el mismo diámetro. Esta longitud equivalente se suma a la longitud real de la tubería para determinar la caída total de presión.

### ***2.2.22 Cálculo de la caída de presión***

$$\Delta P = 1.6 * 10^8 * \left[ \frac{(Q^{1.85} * L)}{(d^5 * P_0)} \right]$$

- $\Delta P$ : Caída de presión (bar)
- $Q$ : Consumo de aire comprimido (m<sup>3</sup>/s)

- $L$ : Longitud de la tubería – incluir el equivalente del accesorio (m)
- $d$ : Diámetro de la tubería (mm)
- $P_0$ : Presión inicial (bar)

### ***2.2.23 Fugas de aire comprimido***

En la práctica, resulta imposible eliminar por completo las fugas; incluso con un mantenimiento adecuado, suelen mantenerse entre un 5 % y un 10 %. Por ello, es necesario medirlas periódicamente, ya que pueden identificarse por secciones dentro del sistema.

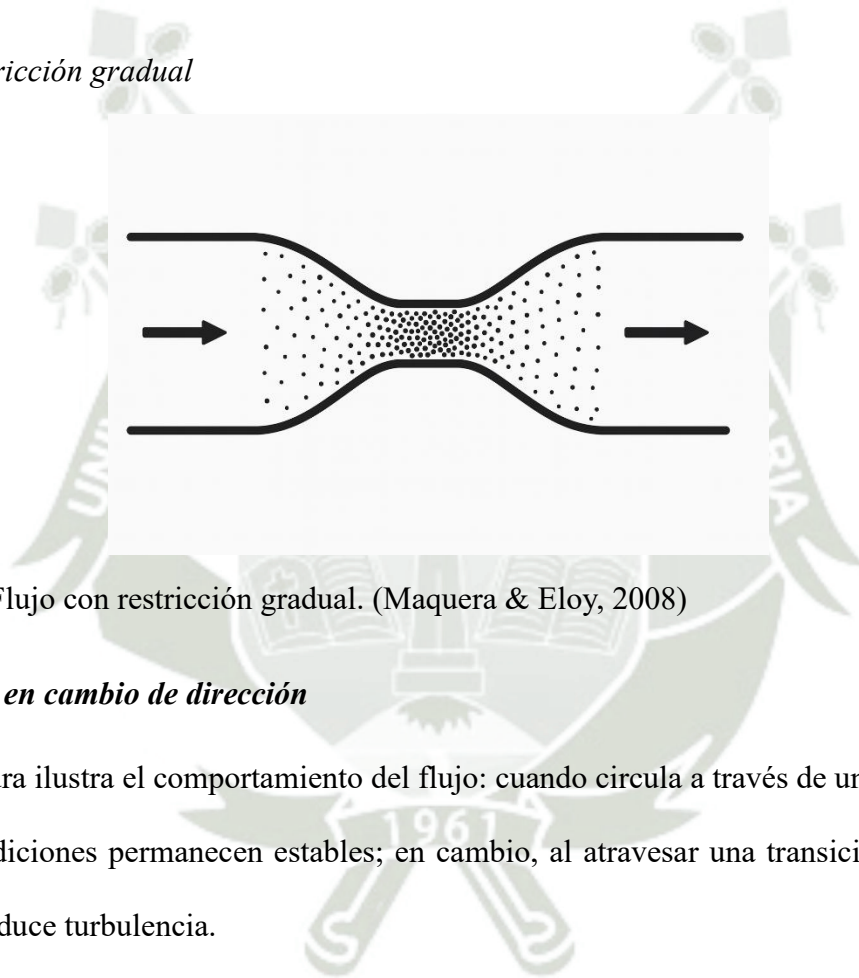
Las fugas en una red de aire comprimido a menudo se deben al tipo de material empleado en las tuberías, por lo que su correcta selección es fundamental. Estas fugas generan averías y elevan significativamente los costos operativos. Incluso un orificio de apenas 3 mm de diámetro puede desperdiciar alrededor de 11 litros de aire comprimido a 7 bar, lo que implica un gasto constante considerable, especialmente si existen múltiples fugas en el sistema. También pueden aparecer pérdidas en la sala de compresores, en las válvulas de herramientas y en cualquier equipo neumático que utilice aire.

Mediante un diseño adecuado del sistema y un análisis de los costos, la inversión en mantenimiento se vuelve necesaria y rentable, con el objetivo de disminuir las fugas al máximo. En instalaciones antiguas, se estima que es posible reducir las fugas hasta en un 30 %. Es esencial que toda la red esté correctamente sellada, en especial en las uniones entre tuberías y los accesorios de línea.

### ***2.2.24 Flujos con restricción gradual***

Para evitar la turbulencia, es necesario que las tuberías tengan un diámetro apropiado y no presenten variaciones bruscas que generen cambios repentinos en la velocidad del flujo. En la figura se aprecia que las partículas se desplazan con mayor velocidad en el centro, y que la restricción permite una transición gradual en las velocidades, lo que ayuda a prevenir la formación de turbulencias.

**Figura 6**  
*Flujo con restricción gradual*



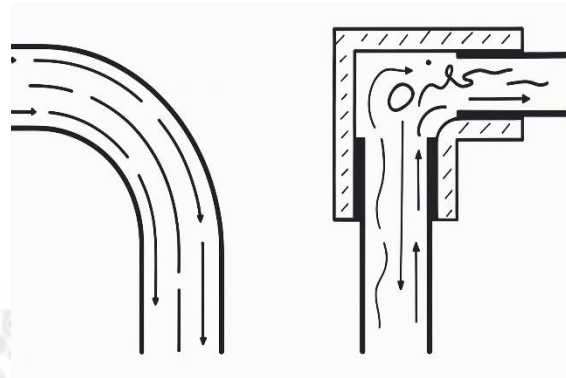
Nota: Flujo con restricción gradual. (Maquera & Eloy, 2008)

### 2.2.25 *Flujos en cambio de dirección*

La figura ilustra el comportamiento del flujo: cuando circula a través de una curva de gran radio, las condiciones permanecen estables; en cambio, al atravesar una transición brusca en la tubería, se produce turbulencia.

**Figura 7**

*Flujos en cambio de dirección*



Nota: Cambio de dirección en flujo. (Maquera & Eloy, 2008)

**2.2.26 Tuberías de aire comprimido**

Para el transporte de aire comprimido se utilizan tres tipos de tuberías:

- **Tubería principal:** Es la conducción que parte del depósito de la estación compresora y transporta la totalidad del caudal de aire. Debe contar con una sección amplia para cubrir las necesidades actuales y futuras.
- **Tubería secundaria:** Son las líneas que derivan de la tubería principal, se distribuyen hacia distintas áreas de trabajo y abastecen a las tuberías de servicio.
- **Tubería de servicio:** Proveen directamente a las máquinas neumáticas. En sus extremos se instalan acoples rápidos junto con filtros, reguladores de presión y lubricadores.

**2.2.27 Hipótesis de consumo**

Para estimar el consumo real, es necesario conocer el modo de operación habitual de todas las máquinas que utiliza la planta de aire. Para ajustar los caudales de consumo se aplican los siguientes coeficientes empíricos:

- **Coefficiente de uso:** Muchas máquinas no demandan aire comprimido de manera continua. Este coeficiente representa la fracción del tiempo de operación durante el cual la máquina efectivamente consume aire.
- **Coefficiente de simultaneidad:** En una mina se emplea una variedad de equipos neumáticos, pero no todos funcionan simultáneamente. En el caso de los equipos de perforación, suele ocurrir que operen al mismo tiempo en varios frentes de trabajo.

### 2.2.28 Ventilación auxiliar

La importancia de contar con una ventilación auxiliar adecuada y eficiente aumenta conforme la mina se expande y avanza hacia frentes ciegos, zonas donde la ventilación principal puede resultar temporalmente insuficiente. La ventilación en estos frentes consiste en retirar el aire contaminado y suministrar un flujo de aire fresco que garantice un ambiente seguro y saludable. Este sistema incluye un ventilador y sus accesorios o mangas, los cuales se instalan a lo largo de la labor y pueden operar en modo de aspiración, impulsión o una combinación de ambos.

Los principales objetivos de la ventilación auxiliar en el interior de una mina son:

- Suministrar el volumen de aire necesario para diluir adecuadamente los gases generados por las voladuras.
- Garantizar una velocidad de aire suficiente para transportar las partículas de roca producidas durante la remoción del mineral.
- Proporcionar un ambiente de trabajo cómodo y seguro mediante un sistema de ventilación que sea eficiente y económicamente viable.

### **2.2.29 Cantidad de aire necesario**

Se toma en cuenta el aire requerido para diluir y desplazar los gases y polvos generados por la voladura, considerando además el tipo de explosivo que se empleará. El caudal de aire necesario en frentes ciegos se determina a partir de la velocidad mínima que debe alcanzar el flujo de aire para reducir los gases tóxicos hasta niveles permitidos, de la siguiente manera:

$$Q = A * V \text{ CFM}$$

- A = área de la sección transversal de la labor
- V= velocidad del aire
- Q= caudal del aire

Por motivos de seguridad se incrementa en un 25% el caudal de aire obtenido en el cálculo, ya que siempre ocurren variaciones en la cantidad de explosivos empleados, lo que a su vez modifica el volumen de gases tóxicos que debe diluirse, quedando de la siguiente forma:

$$Q = 1.2 * Q \text{ CFM}$$

### **2.2.30 Métodos de ventilación auxiliar**

Los sistemas de ventilación que pueden emplearse son de tipo aspirante, impelente o una combinación de ambos. En la ventilación impelente se genera una presión positiva constante, impulsando el aire a través del ducto hacia el frente de trabajo y facilitando la expulsión de los gases mediante conductos rígidos o flexibles. En cambio, la ventilación aspirante crea una presión negativa que succiona el aire desde el frente y lo conduce hacia el exterior a través del ducto. En la práctica, se recomienda utilizar ductos rígidos únicamente en trayectos cortos, mientras que para distancias mayores se prefieren los ductos flexibles reforzados con aros metálicos que ayudan a mantener su forma abierta.

- Factores a considerar para elegir el método de ventilación adecuado:
- El volumen de aire requerido para atender adecuadamente la labor.
- Las características del ventilador, incluyendo su tipo y tamaño.
- El diámetro, la extensión y la clase de ducto a emplear.
- La necesidad de que el aire arrastre los gases del frente y los mantenga siempre por debajo de los límites permisibles de exposición.
- La geometría de las labores, considerando su sección y longitud.
- El tiempo necesario para realizar la ventilación.
- El costo asociado al sistema de ventilación auxiliar.

### **2.2.31 Ductos**

El diámetro del ducto se determina en función de la sección de la labor, del tipo de equipos que circulan por ella y del caudal de aire que se necesita inyectar o extraer en el área de trabajo. Para este cálculo se emplea la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q * t}{P * I * V_s}} \text{ Pulg}$$

- D = Diámetro.
- $V_s$  = velocidad del aire en el ducto

### **2.2.32 Clases de ductos o mangas utilizados en la ventilación**

En minería se emplean principalmente tres tipos de ductos para la ventilación auxiliar: rígidos, flexibles sin refuerzo y flexibles reforzados con alambre. Cada uno de ellos cumple

funciones específicas según la geometría de la labor, el sistema de ventilación seleccionado y las condiciones operativas del frente.

Los ductos rígidos, por lo general fabricados en metal aunque también existen versiones en fibra de vidrio, tienen longitudes estándar de tres metros y diámetros que varían entre 18 y 48 pulgadas. Su principal ventaja es su alta resistencia estructural, lo que les permite mantener el caudal de aire con mínimas pérdidas por fricción y deformación. Además, son adecuados tanto para ventilación impelente como aspirante, ya que mantienen una superficie interna estable y permiten un flujo constante. No obstante, su rigidez también constituye su mayor inconveniente: presentan dificultades de transporte, almacenamiento y maniobrabilidad, especialmente en labores estrechas o con geometrías irregulares. Aun así, siguen siendo la mejor opción en entornos donde se requiere un control preciso del flujo o donde la línea de ventilación exige durabilidad prolongada.

Los ductos flexibles sin refuerzo, fabricados generalmente en lona o materiales sintéticos similares, se comercializan en longitudes de 15 y 30 metros. Ofrecen una resistencia media y destacan por su bajo peso y facilidad de instalación, lo que reduce significativamente los costos operativos. Cuando son instalados en línea recta y sujetos a la corona de la labor, funcionan de manera eficiente y son ideales para frentes en avance rápido, donde se requiere mover el ducto constantemente conforme progresa el desarrollo. Sin embargo, debido a su falta de estructura interna, pueden colapsar o deformarse en condiciones de presión elevada o cuando hay curvas pronunciadas.

Los ductos flexibles reforzados, confeccionados con lona y un alambre interno helicoidal, presentan una mayor estabilidad estructural. Este refuerzo les permite mantener su forma incluso bajo condiciones de succión o impulsión más exigentes, lo que los hace aptos tanto para ventilación

aspirante como impelente. Aunque no se recomiendan para distancias superiores a 90 metros debido al incremento en pérdidas de presión, son considerados excelentes para labores con ángulos, cambios de dirección o geometrías complejas, donde los ductos rígidos serían difíciles de maniobrar. Además, su flexibilidad reforzada les permite mantener un flujo relativamente estable sin colapsar en tramos críticos.

En la práctica minera moderna, la selección del ducto depende no solo de la resistencia y maniobrabilidad, sino también de factores como el caudal requerido, la presión del ventilador, el tiempo de avance, la rugosidad interna del ducto, y los costos de sustitución o mantenimiento. En operaciones de gran escala, también se considera la eficiencia energética del sistema, ya que un ducto mal seleccionado puede ocasionar pérdidas significativas de presión, obligando a utilizar ventiladores más potentes y elevando el consumo eléctrico.

### **Figura 8**

*Manga de ventilación en minería subterránea*



Nota: Referencia de manga de ventilación en entrada de mina subterránea.

### 2.2.33 Ventiladores para minas subterráneas

En los estudios de ventilación subterránea, uno de los pasos fundamentales es la elección del equipo más adecuado para garantizar el caudal y la presión de aire necesarios dentro de la mina. La selección del ventilador debe realizarse considerando los siguientes aspectos:

- **Demanda de aire y aporte de ventilación natural:** Es indispensable determinar la cantidad de aire requerida y evaluar si existe ventilación natural que pueda complementar el sistema. Se debe realizar un seguimiento continuo del comportamiento del flujo y analizar las variaciones que surgen durante las distintas estaciones del año.
- **Disponibilidad de varios ventiladores adecuados:** En algunos casos puede haber más de un ventilador capaz de cubrir la demanda. Para elegir el más eficiente se utilizan las curvas características de cada equipo y se compara la potencia necesaria para impulsar un caudal determinado a través del sistema de ventilación.
- **Aumento de resistencia con mayor caudal:** A medida que se incrementa el flujo de aire que circula por los ductos, también aumenta la resistencia por fricción en las paredes internas del conducto. La energía que vence esta resistencia proviene de la presión estática generada por el ventilador.
- **Función de la presión estática:** La presión estática permite superar la resistencia del sistema y posibilita que el ventilador desplace el aire, generando además una componente denominada presión de velocidad, responsable del movimiento del flujo.

- Resistencia total del sistema: La suma de la presión estática y la presión de velocidad determina la resistencia total que debe vencer el sistema de ventilación.
- Incremento del caudal mediante ventiladores en serie: Para aumentar el caudal de aire puede optarse por instalar dos o más ventiladores en serie. En estas configuraciones es recomendable que los equipos tengan curvas características iguales o muy similares para asegurar un funcionamiento estable y evitar desequilibrios en la operación.
- Incremento del caudal mediante ventiladores en paralelo: Otra alternativa para aumentar el volumen de aire es conectar ventiladores en paralelo, de manera que ambos succionen desde el mismo punto y descarguen hacia el mismo ducto. En este caso, los ventiladores operan a la misma presión y el caudal total es la suma de los caudales individuales. Nuevamente, es preferible que sus curvas características sean similares.

### ***2.2.34 Clasificación de ventiladores***

#### **Ventiladores centrífugos**

Los ventiladores centrífugos se caracterizan por incorporar una rueda provista de álabes (o paletas) que gira alrededor de un eje. Cuando el rotor entra en funcionamiento, el aire es aspirado a través del canal de entrada y, debido al movimiento rotacional, es desviado aproximadamente 90 grados, siguiendo la dirección de giro de la rueda. Todo este conjunto se encuentra alojado dentro de una carcasa en forma de espiral, también conocida como voluta.

El aire, una vez impulsado por la rueda, es conducido hacia el difusor, un componente diseñado para reducir la velocidad del flujo saliente, disminuyendo así las pérdidas de presión

producidas por los choques internos. Gracias a este diseño, los ventiladores centrífugos pueden operar tanto como aspirantes como impelentes, pudiendo contar con una o varias entradas de aire.

Tipos de álabes o paletas:

### **Álabes curvados hacia adelante**

- Producen mayor presión para una misma velocidad y RPM en comparación con otros diseños.
- Generan un flujo de aire de alta velocidad, por lo que requieren una conducción muy cuidadosa para evitar turbulencias y pérdidas por choque.
- Son adecuados cuando se requieren presiones moderadas con equipos de tamaño compacto.

### **Álabes radiales**

- Tienen un diseño simple y robusto.
- Soportan bien polvos y partículas abrasivas, por lo que se emplean en ambientes donde la corriente de aire contiene impurezas.
- Su rendimiento es menor, pero su durabilidad es mayor.

### **Álabes curvados hacia atrás**

- Son los de mayor eficiencia energética, ofreciendo mejor rendimiento que los demás tipos.
- Se emplean comúnmente en minas con secciones estrechas, donde la resistencia del sistema es elevada.

- Generan menor ruido y consumen menos energía para un mismo caudal.

Se debe considerar:

- Los ventiladores centrífugos son muy utilizados en minería subterránea debido a su capacidad para generar altas presiones, lo cual es esencial en ductos largos o sistemas con elevada resistencia por fricción.
- Suelen ser más robustos que los ventiladores axiales, aunque también más voluminosos.
- Gracias a su diseño con carcasa espiral, permiten un control más preciso de la dirección y el comportamiento del flujo de aire.

### **Ventiladores axiales**

Los ventiladores axiales están contruidos generalmente con una carcasa cilíndrica, similar a un tubo, en cuyo centro se ubica un eje donde se montan las hélices o álabes encargados de impulsar el aire en dirección paralela al eje de rotación. Estos ventiladores suelen incluir además una corona directriz, así como conductos de entrada y un difusor, elementos que permiten optimizar el flujo y mejorar la eficiencia del sistema.

Una variante común de estos ventiladores es la configuración formada por la conexión en serie de dos impulsores, diseñados de manera que impartan al aire movimientos rotacionales en sentidos opuestos. Este arreglo ayuda a compensar la rotación helicoidal del flujo, mejorando su estabilidad. Para ello, los equipos cuentan con coronas enderezadoras, cuya función es corregir las espirales de aire generadas por la hélice y orientar el flujo para que salga alineado con el eje del ventilador.

Un aspecto destacado de los ventiladores axiales es que las paletas o hélices pueden ser ajustables en muchos modelos, permitiendo cambiar su ángulo de ataque. Esto facilita adaptar un mismo ventilador a diferentes necesidades de volumen y presión, ofreciendo gran versatilidad operativa en sistemas de ventilación minera.

Se debe considerar:

- Los ventiladores axiales son ideales para mover grandes caudales a baja y media presión, lo que los hace muy utilizados en ventilación principal y auxiliar de minas.
- Son equipos más ligeros y compactos que los centrífugos, lo que facilita su transporte, instalación y mantenimiento.
- Gracias a su diseño, generan un flujo más uniforme y suelen ser más silenciosos.
- Sin embargo, su rendimiento puede disminuir si el sistema de ductos tiene alta resistencia o muchas pérdidas por fricción, condiciones en las que un ventilador centrífugo suele ser más eficiente.

**Figura 9**  
*Ventilador axial*



Nota: Imagen de ventilador axial

## 2.3 Hipótesis

Al optimizar el sistema de aire comprimido, se logra satisfacer de manera efectiva las necesidades, la disponibilidad y los requerimientos específicos de caudal y presión de aire en el interior de la mina Huachocolpa. Esto tiene un impacto directo y positivo en el incremento de la productividad de las operaciones mineras.

## 2.4 Variables

### 2.4.1 *Variable dependiente*

- Minimización de caídas de presión por longitud de tubería, cambio de dirección y presencia de accesorios para optimizar las operaciones mineras subterráneas

### 2.4.2 *Variable independiente*

- Mejoramiento y control del sistema de aire comprimido en operaciones mineras subterráneas

**Tabla 2**  
*Optimización de variables*

	<b>Variables</b>	<b>definición</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Variable independiente</b>	Mejoramiento y control del sistema de aire comprimido en operaciones mineras subterráneas.	Minimización de caídas de presión por longitud de tubería, cambio de dirección y presencia de accesorios	Caídas de presión por longitud de tubería, cambio de dirección y presencia de accesorios Optimización de labores mineras subterráneas que hacen uso de aire comprimido
<b>Variable dependiente</b>	Minimización de caídas de presión por longitud de tubería, cambio de dirección y presencia de accesorios para optimizar las operaciones mineras subterráneas		Control y seguimiento de la red de aire comprimido Rendimiento de equipos accionados por aire comprimido. Distribución actual del sistema de aire comprimido

Nota: El cuadro es de autoría propia y cada definición operacional se fundamenta en teoría corroborada



## CAPÍTULO III

### 3 MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Alcances y limitaciones

##### 3.1.1 Alcances de la investigación

El criterio principal para el diseño de una red de aire comprimido consiste en determinar los diámetros de la tubería que permitan una caída de presión mínima (económicamente justificable) entre el punto de producción (casa de compresores) y el punto de consumo.

Una caída de presión económicamente justificable se define como una caída de presión de 5 a 6 PSI entre el punto de producción (casa de compresores) y el punto de consumo más alejado; la ruta para llegar a dicho punto más alejado la denominamos ruta crítica.

En el diseño u optimización de una red de distribución de aire comprimido se considera el caudal de consumo que representa la suma de los caudales requeridos en los nodos finales de la red, que representan las labores.

El consumo en cada punto final está determinado por el caudal de consumo de cada equipo que utiliza aire comprimido para su normal operación. Aquí se puede distinguir dos caudales determinados por el coeficiente de simultaneidad ( $K_s$ ) de la utilización de dichos equipos: el primero, es la suma total de los caudales de consumo; el segundo, es la suma de los caudales en el punto de consumo multiplicados por el coeficiente de simultaneidad ( $K_s$ , que va de 0 a 1).

El caudal total se utiliza para determinar los diámetros óptimos de las tuberías mientras que el segundo caudal (considerando el factor de simultaneidad) se utiliza para determinar la capacidad de la casa de compresores. El caudal y los coeficientes de simultaneidad en el punto de consumo son datos provistos por el usuario (departamentos de Mina y Planeamiento).

### **3.1.2 Limitaciones de la investigación**

La principal limitante de esta investigación son los aspectos relacionados a los costos de la implementación de la nueva red de distribución de aire comprimido HDPE, ya que sabemos que en el mercado hay de diferentes calidades, pero a su vez la mina opta por lo que cree que cumplirá sus funciones a cabalidad.

## **3.2 Tipo y nivel de investigación**

### **3.2.1 Tipo de investigación**

El proyecto va a emplearse bajo un tipo de investigación aplicada, debido a que una investigación de este tipo se orienta a dar soluciones prácticas y funcionales a problemas reales que se presentan en la vida diaria, en este caso el propósito es resolver un problema específico del sector minero, el cual se refiere a la necesidad de mejorar el sistema de aire comprimido en minas subterráneas para mejorar el proceso de producción.

### **3.2.2 Nivel de investigación**

La investigación se clasificará como comparativa, experimental y explicativo. En primer lugar, será comparativa, ya que se estudiarán diferentes tecnologías y métodos de aplicación de aire comprimido, esto llevará a ver las ventajas y desventajas de los métodos aplicados, eficiencias y costos por otro lado, también será experimental, ya que se llevarán a cabo pruebas en el campo para medir el rendimiento del sistema optimizado. Al realizar estas pruebas, se podrá observar el impacto de las mejoras propuestas en un entorno operativo real.

### 3.3 Población y muestra o universo

#### 3.3.1 Población

Una población son elementos accesibles donde se desarrolla el estudio. Por lo que, para el proyecto de investigación la población incluye la red de distribución de aire comprimido y equipos compresores que operan en la Unidad Minera Huachocolpa Uno.

#### 3.3.2 Muestra

La muestra es una parte representativa de la población que tenga las mismas características. Por tal razón, dentro de la investigación la muestra corresponde a los siguientes elementos:

- **Compresores:** Los compresores usados en la unidad minera Huachocolpa son, ATLAS COPCO GA 315 VSD y ATLAS COPCO GA 400
- **Personal técnico:** La muestra de personal técnico incluye a los operadores y técnicos de mantenimiento encargados de la operación diaria y el mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de compresores. A través de entrevistas estructuradas y observación en campo, se recopiló información detallada sobre los desafíos y limitaciones del sistema actual.
- **Sensores de monitoreo:** También forman parte de la muestra los dispositivos de medición instalados en puntos clave del sistema, como los sensores de compresión, que fueron utilizados para registrar datos en tiempo real antes y después de las modificaciones implementadas.

### 3.4 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las principales técnicas utilizadas serán la documental y la de tipo cuantitativa, debido a que se recopilarán los datos a partir de fuentes bibliográficas como libros, artículos científicos, tesis de pregrado y postgrado, como el uso de normativas técnicas y manuales de operatividad sobre compresores y aire comprimido. Todos estos datos serán organizados mediante el uso de fichas de resumen para una mejor interpretación de la información clave y por ende su análisis idóneo.

Los instrumentos de recolección de datos serán medidores de presión y softwares especializados en cálculo y análisis, los cuales serán utilizados para monitorear y evaluar el comportamiento del sistema de compresión.

#### 3.4.1 Técnicas de recolección de datos

- **Análisis documental:** Se analizaron los planos, las curvas características, los informes técnicos, los reportes de mantenimiento, los manuales de operación y el procedimiento relacionado con el aire comprimido. Esta documentación facilitó entender cómo está configurado el sistema y qué opciones existen para optimizarlo.
- **Método de observación directa:** Se evaluó el desempeño del sistema en operación, recopilando datos sobre las presiones del aire comprimido y los parámetros de funcionamiento. Esta observación hizo posible detectar zonas críticas.

### 3.4.2 *Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

- **Análisis documental:** Seguimiento continuo de las horas de operación y del consumo de energía.
- **Comparación:** Análisis del desempeño del sistema bajo distintos escenarios.

Instrumentos empleados:

- Manómetros industriales para medir presión.
- Panel eléctrico (kW/kWh) para determinar el consumo energético.
- Software especializado (Excel).

Los instrumentos se eligieron por su confiabilidad en condiciones mineras y fueron calibrados para asegurar la exactitud necesaria en las mediciones.

### 3.4.3 *Plan de análisis estadístico de los datos*

El análisis estadístico permitirá interpretar la información recopilada durante las pruebas en condiciones reales de operación, evaluar el desempeño del sistema optimizado y verificar la efectividad de las mejoras aplicadas, así como su validez en términos de optimización. A continuación, se detalla el plan de análisis estadístico:

- **Análisis descriptivo antes y después de la optimización:** Se examinarán variables como el caudal de aire, la estabilidad de presión en la red, la eficiencia mecánica y el tiempo de operación de los compresores, con el fin de identificar la variabilidad en el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios operativos en la mina subterránea.

- **Evaluación del impacto operativo:** Se estudiará la reducción de pérdidas de presión en la red, la mejora en la disponibilidad de aire en frentes de trabajo, la disminución de tiempos muertos y la reducción en la necesidad de arranques frecuentes de los compresores.

### 3.5 Lugar de desarrollo de investigación

La Mina Caudalosa se encuentra situada en el flanco oriental de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales. Administrativamente, está ubicada en el distrito de Huachocolpa, dentro de la provincia y región de Huancavelica, a una altitud aproximada de 4480 m s. n. m.

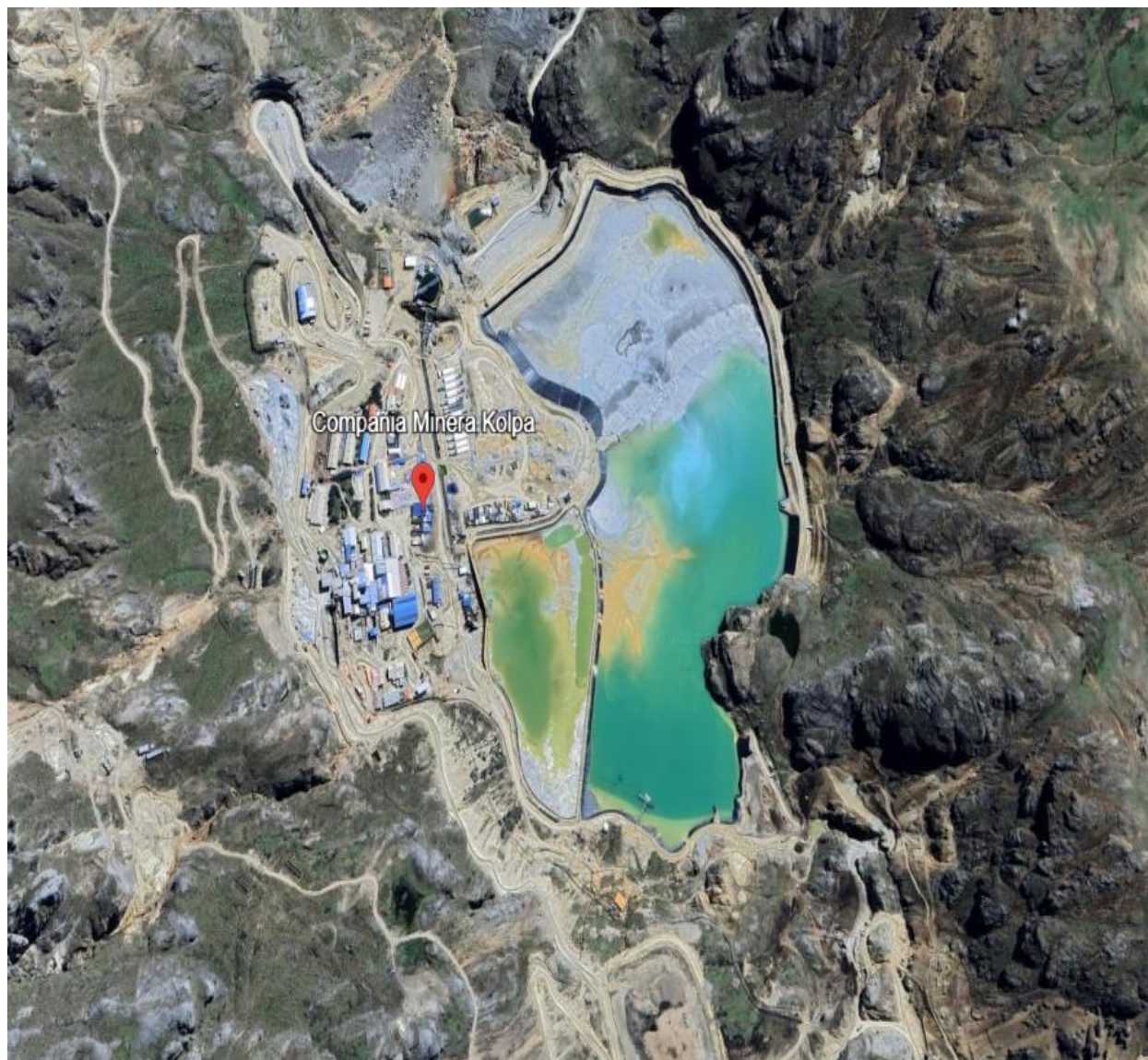
Sus coordenadas geográficas son:

- **Longitud:** 74° 53' 43" Oeste
- **Latitud:** 13° 03' 52" Sur

En sistema UTM, la ubicación corresponde a:

- **Este (E):** 502,230.550
- **Norte (N):** 8 555,752.860

**Figura 10**  
*Ubicación Geográfica*



Nota: Fuente Google Earth.

### 3.6 Caracterización del sistema actual de aire comprimido

El sistema de aire comprimido de la Unidad Minera Huachocolpa cumple un rol esencial en las operaciones subterráneas, especialmente en las labores de perforación, empaques, sostenimiento, limpieza y operación de equipos neumáticos. Actualmente, el sistema presenta limitaciones derivadas del incremento progresivo de frentes de trabajo y del crecimiento productivo de la operación, lo que ha generado un déficit de aire significativo.

La planta de compresoras está conformada principalmente por:

- Un compresor ATLAS COPCO GA 315 VSD.
- Un compresor ATLAS COPCO GA 400.
- Tuberías HDPE en diámetros que van desde 2" hasta 12".
- Secciones de tubería metálica en tramos antiguos.
- Calderines o depósitos de aire distribuidos estratégicamente.
- Red de accesorios que incluyen tees, codos, válvulas y acoples.

El consumo total requerido para cubrir la demanda operativa asciende a 3,131.7 CFM, mientras que la capacidad efectiva de producción es de solo 2,326 CFM, originando un déficit de 805.7 CFM que repercute directamente en la presión disponible en los frentes de perforación. Esta condición se traduce en un rendimiento deficiente de los equipos neumáticos, mayores tiempos de perforación y, por ende, menor productividad.

### 3.7 Análisis de presión y caudal en la red actual

El análisis de presión es uno de los indicadores más críticos, debido a que determina la capacidad real del sistema para abastecer adecuadamente las labores de perforación. Las mediciones realizadas en campo con manómetros industriales calibrados permitieron identificar variaciones significativas entre los valores ideales y los valores reales registrados en distintos puntos de la red.

Los puntos con mayores caídas de presión se presentan en las líneas derivadas hacia las zonas más alejadas, especialmente en la derivación hacia la chimenea 251, donde los registros indican presiones mínimas que comprometen seriamente la eficiencia de los equipos neumáticos.

**Tabla 3**  
*Presiones registradas en puntos críticos de la red (PSI)*

Punto de medición	Presión ideal	Presión real	Diferencia
Sala de compresores	100	97	-3
Depósito principal	95	86	-9
Línea principal tramo 1	90	79	-11
Derivación a 251	90	74	-16
Frente 251-C	90	68	-22
Frente 252-A	90	70	-20

Nota: Puntos de medición de red de aire comprimido

Las pérdidas detectadas superan ampliamente los valores operativos aceptables. En algunos casos, las caídas sobrepasan los 20 PSI, lo que se traduce en un funcionamiento deficiente de equipos como Jacklegs y Jumbos, cuya operación depende de mantener un rango de presión estable por encima de 90 PSI.

### 3.8 Análisis de caudal y simultaneidad

El análisis de caudal es fundamental para determinar la capacidad real del sistema de aire comprimido para abastecer simultáneamente a múltiples equipos neumáticos utilizados en las labores de perforación. Para ello, se consideraron los consumos de catálogo de cada equipo, ajustados mediante el factor de corrección por la altitud y la presión real de operación en la mina.

En minería subterránea, los equipos neumáticos no operan de manera continua, por lo que es indispensable aplicar coeficientes empíricos tales como:

- Coeficiente de uso ( $K_u$ ): proporción del tiempo en que un equipo consume aire.
- Coeficiente de simultaneidad ( $K_s$ ): representa la cantidad de equipos que operan simultáneamente en una misma corrida de guardia.

**Tabla 4**  
*Consumo real ajustado por simultaneidad*

Equipo	Caudal catálogo (CFM)	Caudal real (CFM)	$K_s$	Demanda efectiva
Jackleg	125	142	0.7	99.4
Stoper	140	158	0.6	94.8
Winche neumático	80	92	0.5	46.0
Equipo de shotcrete	250	285	0.4	114.0
Equipos varios	320	365	0.3	109.5

Nota: Consumo real ajustado por simultaneidad de equipos de mina

El caudal total ajustado demuestra que la demanda efectiva supera la capacidad de producción de los compresores en servicio, corroborando el déficit de 805.7 CFM identificado previamente. Este desbalance provoca caídas de presión críticas y una recuperación lenta en las líneas derivadas hacia los frentes 251 y 252.

### 3.9 Análisis de pérdidas por fricción y accesorios

El movimiento del aire comprimido a través de la red genera pérdidas de presión debido al rozamiento del flujo con las paredes internas de la tubería y con los accesorios instalados (codos, tees, válvulas, reducciones). Para evaluar este comportamiento, se aplicó la ecuación general de pérdida por fricción:

$$\Delta P: \frac{(f * L * V^2)}{2 * g * D}$$

Donde:

- $f$ : Coeficiente de fricción, dependiente del material.
- $L$ : Longitud equivalente (longitud real + longitudes equivalentes de accesorios).
- $V$ : Velocidad del aire comprimido.
- $D$ : Diámetro interno de la tubería.

#### 3.9.1 Longitudes equivalentes utilizadas

- Codo 90°: 2.5 m
- TEE: 3.1 m
- Reducción: 1.7 m

**Tabla 5**  
*Longitud equivalente del sistema actual*

Tramo	Longitud real (m)	Accesorios (m)	Longitud total (m)
Línea principal	480	62	542
Derivación a 251	220	38	258
Derivación a 252	270	44	314

Nota: Longitudes de tramos

Las elevadas longitudes equivalentes demuestran que la red actual presenta una concentración excesiva de accesorios, incluyendo curvas cerradas y TEES ubicadas en zonas de alta demanda. Esto genera un incremento en la turbulencia interna, reduciendo la presión en los puntos críticos de perforación.

Asimismo, la presencia de tuberías de diámetro reducido provoca una aceleración del flujo, incrementando aún más las pérdidas debido al término cuadrático  $V^2$  en la ecuación de caída de presión. Por esta razón, se concluye que el ajuste de diámetros en la red secundaria es indispensable para recuperar presión útil.

### 3.10 Evaluación energética del sistema actual

El desempeño energético de los compresores es un factor clave en la valoración de la eficiencia del sistema. Las mediciones obtenidas del panel eléctrico (kW/kWh) permiten comparar la energía consumida frente a la energía teórica necesaria según las curvas de operación de los compresores ATLAS COPCO GA 315 VSD y GA 400.

**Tabla 6***Consumo energético registrado (kWh)*

Compresor	kWh esperado	kWh real	Incremento
GA 315 VSD	185	212	27
GA 400	250	294	44

Nota: Consumo de compresores

El sistema está operando por encima de su consumo esperado debido a:

- Alta frecuencia de arranques y paradas.
- Pérdidas de presión acumuladas en la red.
- Compensación automática de presión en condiciones de déficit de caudal.
- Fugas no controladas en tramos antiguos de tubería metálica.

Esto se traduce en un aumento del consumo energético entre 12% y 18% por encima de lo previsto. La optimización del sistema permitirá disminuir significativamente esta sobrecarga energética al reducir la demanda artificial causada por el déficit de caudal.



La figura muestra el trazado de la nueva red de distribución, donde se destacan los nuevos diámetros, el ordenamiento de las derivaciones y la eliminación de accesorios innecesarios. La reorganización de los ramales reduce drásticamente los puntos donde se producían caídas súbitas de presión.





#### 4 Comparación antes y después de la optimización

Para evaluar objetivamente la mejora del sistema, se compararon los indicadores principales antes y después de implementar la optimización. Se midieron presión disponible, caudal efectivo, pérdidas de presión, eficiencia energética y rendimiento operativo de los equipos de perforación.

**Tabla 8**  
*Comparación técnica del sistema antes/después*

<b>Parámetro</b>	<b>Actual</b>	<b>Optimizado</b>	<b>Mejora</b>
Caudal total (CFM)	2326	3180	854
Presión en frentes (PSI)	68–74	88–92	18–24
Caída de presión (PSI)	20–22	6–8	-65%
Eficiencia de perforación (%)	Baja	Alta	40%
Consumo energético	Alto	Reducido	-27%

Nota: Comparación del sistema

Los resultados demuestran una mejora sustancial en todos los parámetros evaluados. El aumento de presión en los frentes permite que las perforadoras alcancen su capacidad nominal, incrementando la velocidad de penetración y reduciendo los tiempos de perforación por guardia.

Asimismo, la notable disminución de la caída de presión asegura una operación continua y estable, reduciendo la necesidad de pausas operativas causadas por la recuperación de presión en la red. La eficiencia energética mejora debido a que los compresores ya no requieren compensar el déficit de caudal mediante sobrecarga.

#### 4.1 Impacto operativo de la optimización

La implementación del sistema optimizado genera múltiples beneficios operativos que impactan directamente en la productividad de la mina. Entre los principales efectos positivos se encuentran:

- **Incremento del avance por guardia:** La presión estable superior a 90 PSI permite que las perforadoras trabajen dentro de su rango óptimo, aumentando la velocidad de penetración.
- **Reducción de tiempos muertos:** Se elimina la necesidad de esperar la recuperación de presión en las líneas más alejadas, lo que reduce significativamente las interrupciones operativas.
- **Menor desgaste de componentes:** La disminución de turbulencias y variaciones bruscas de presión reduce el desgaste de mangueras, acoples, válvulas y componentes internos de los equipos neumáticos.
- **Disminución del consumo energético:** Los compresores trabajan en rangos más eficientes, reduciendo entre 12% y 18% el consumo energético general del sistema.
- **Mayor confiabilidad en labores de avance y desarrollo:** Los frentes críticos como 251-C y 252-A ahora operan con presión suficiente para cumplir los objetivos de producción sin limitaciones por aire comprimido.

En conjunto, estos impactos mejoran significativamente la eficiencia global del ciclo de perforación–voladura, incrementando la capacidad productiva de la mina.

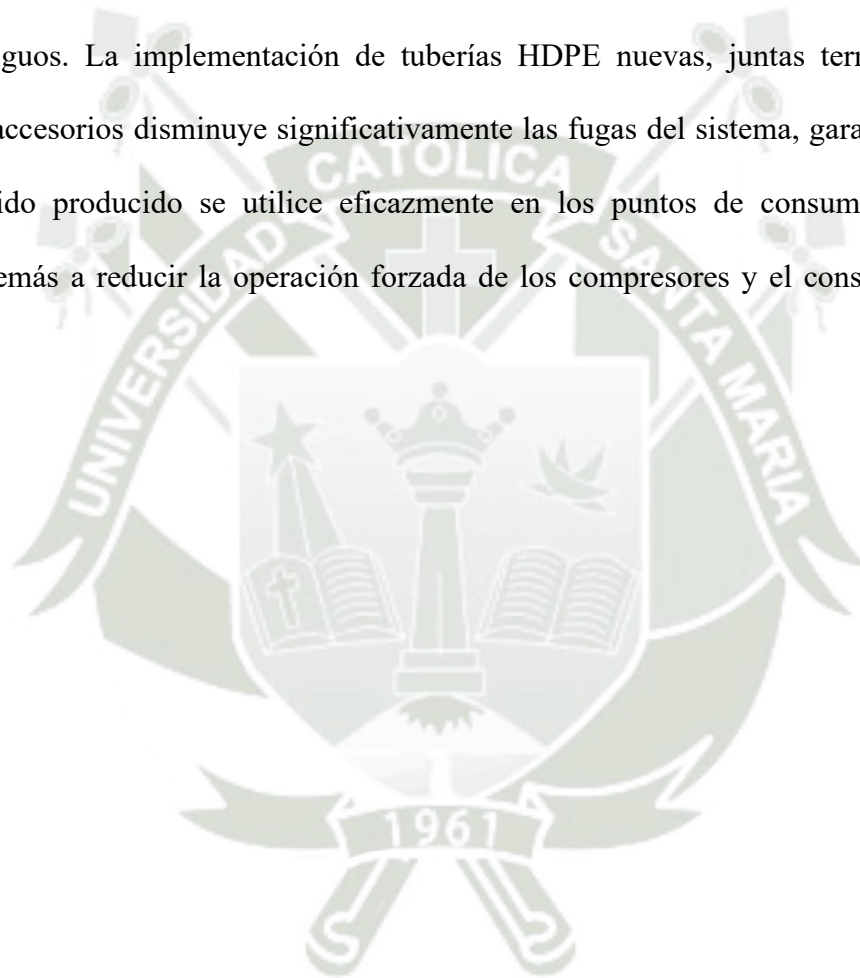
## 4.2 CONCLUSIONES

- Se concluye que la optimización integral del sistema de aire comprimido permitió mejorar significativamente la eficiencia del proceso de perforación en la Unidad Minera Huachocolpa, cumpliendo el objetivo general planteado. El rediseño de la red, basado en el análisis técnico del informe, incrementó la presión en los frentes críticos desde valores de 68–74 PSI a un rango óptimo de 88–92 PSI, lo que garantiza el funcionamiento adecuado de perforadoras Jackleg y Stoper. Asimismo, se redujo el déficit estructural de aire comprimido, pasando de una brecha de –805.7 CFM a una capacidad total optimizada de 3,180 CFM, suficiente para cubrir la demanda actual.
- La propuesta de circuito optimizado cumple con los requisitos de caudal y presión exigidos por los equipos neumáticos utilizados en la mina. El redimensionamiento de tuberías principales a 6” PN16, secundarias a 4”, y derivaciones a 3”, junto con la eliminación de accesorios innecesarios, permitió que el nuevo sistema satisfaga completamente la demanda simultánea de las perforadoras, winches y equipos auxiliares. El nuevo diseño garantiza la entrega de caudal suficiente incluso en condiciones de máxima exigencia operativa.
- El análisis del comportamiento del flujo demostró que la red actual presentaba caídas de presión superiores a 20 PSI, debido principalmente a:
  - Exceso de TEES y codos cerrados.
  - Diámetros insuficientes.
  - Longitudes equivalentes elevadas.

- Tramos antiguos metálicos con fricción aumentada.

La propuesta optimizada disminuyó las caídas de presión a valores entre 6–8 PSI, lo que representa una reducción aproximada del 65%, alcanzando los rangos recomendados (5–6 PSI) según la teoría y criterios de diseño incluidos en tu marco teórico y en el informe técnico.

El levantamiento de campo identificó fugas en conexiones, uniones deterioradas y tramos metálicos antiguos. La implementación de tuberías HDPE nuevas, juntas termofusionadas y reducción de accesorios disminuye significativamente las fugas del sistema, garantizando que el aire comprimido producido se utilice eficazmente en los puntos de consumo. Este control contribuye además a reducir la operación forzada de los compresores y el consumo energético asociado.



### 4.3 RECOMENDACIONES

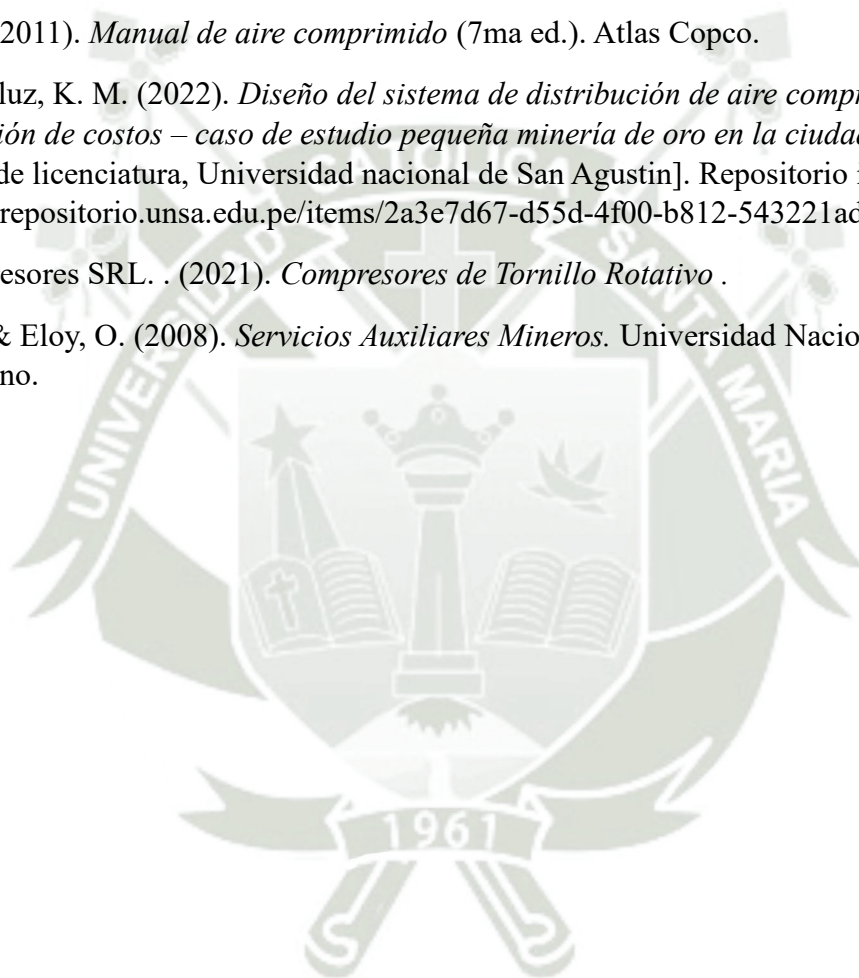
- Se recomienda ejecutar la instalación completa del circuito de aire comprimido propuesto, priorizando los tramos principales y derivaciones hacia frentes críticos, considerando los diámetros y materiales establecidos en el estudio técnico. Esto asegurará que la mejora del caudal y presión obtenida en el modelamiento se refleje efectivamente durante la operación subterránea.
- El sistema de aire comprimido debe someterse a inspecciones periódicas utilizando:
  - Monitoreo de presión en nodos críticos.
  - Identificación de fugas con medidores ultrasónicos.
  - Registro de pérdidas en accesorios.

Con ello se evitará que vuelvan a aparecer zonas con baja presión y se mantendrá la eficiencia lograda tras la optimización.

- Se recomienda que la mina mantenga un inventario actualizado de diámetros, longitudes y accesorios utilizados en toda la red de aire comprimido. Esto facilitará futuras expansiones (como nuevas vetas o avances) y permitirá recalcular adecuadamente la simultaneidad y el caudal requerido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aedo Quiroz, F. A. (2013). *Diseño, calculo y evaluación del sistema y red de aire comprimido en Minas Subterranas*. [Tesis de licenciatura, Universidad nacional de San Agustin]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/de32d61c-3dd8-4dd4-a3ba-caf5eec0d98c>
- Atlas Copco. (2011). *Manual de aire comprimido* (7ma ed.). Atlas Copco.
- Bejarano Eguiluz, K. M. (2022). *Diseño del sistema de distribución de aire comprimido para la reducción de costos – caso de estudio pequeña minería de oro en la ciudad de Arequipa*. [Tesis de licenciatura, Universidad nacional de San Agustin]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/2a3e7d67-d55d-4f00-b812-543221ade7d4>
- Kaeser Compresores SRL. . (2021). *Compresores de Tornillo Rotativo* .
- Maquera, L., & Eloy, O. (2008). *Servicios Auxiliares Mineros*. Universidad Nacional del Altiplano.



## ANEXOS

### ANEXO 1: CAPACIDAD ACTUAL DE LA CASA DE COMPRESORES – PLACA DEL COMPRESOR

MARCA	MODELO	AÑO	POTENCIA		PRESION TRABAJO		CAPACIDAD	
			kW	HP	BAR	PSI	aCFM	sCFM
ATLAS COPCO	GA 315 VSD	2009	248	381	10.2	148	1648.5	940.6
ATLAS COPCO	GA 400	2009	391	524	9.1	132	2208.0	1259.8
			639	905			3856.5	2326.0

### ANEXO 2: COMPRESOR ATLAS COPCO GA 315 VSD

Atlas Copco GA315VSD

[Ask price](#)



Número de referencia	010258
Marca	Atlas Copco
Modelo	GA315VSD
Potencia del motor	315,00 kW
Voltaje del motor	400V/50Hz
Presión máx.	8,50 bar
Caudal	58,50 m <sup>3</sup> /min
Horas totales	36.285 h
Convertidor de frecuencia	
Refrigerado por aire	
Compresor	
Con aceite inyectado	
Año de fabricación	2019

**!** Nota:  
Atlas Copco GA 315 VSD

### ANEXO 3: COMPRESOR ATLAS COPCO GA 315 VSD

Atlas Copco GA400W

Ask price



Número de referencia	010581
Marca	Atlas Copco
Modelo	GA400W
Potencia del motor	400,00 kW
Voltaje del motor	6000 Volt
Presión máx.	8,50 bar
Caudal	66,60 m <sup>3</sup> /min
Velocidad fija	FS →
Refrigerado por agua	🌊
Compresor	📦
Con aceite inyectado	💧
Año de fabricación	2009

📌 Nota:  
Atlas Copco GA 400 W

**ANEXO 4: INVENTARIO DE TUBERÍAS LÍNEA ACTUAL**

INVENTARIO DE TUBERIAS LINEA ACTUAL					
HDPE ASTM F714 PE 3408 SDR 13.5					
PULGADAS					
2	4	6	8	10	12
METROS LINEALES					
794.8	13,373.6	0.0	1,147.5	771.2	1,109.0
AL FINAL DE CADA NODO (TRONCAL) SE ESTA CONSIDERANDO 50 M DE TUBERÍA DE 2 PULG Y PARA LA ALILMENTACION DE LOS TALLERES					

**ANEXO 5: INVENTARIO DE TUBERÍAS DE LA RED PROPUESTA  
(MODIFICACIÓN 2)**

INVENTARIO DE TUBERIAS ACTUAL, MÓDIFICADA, AMPLIADA Y OPTIMIZADA					
HDPE ASTM F714 PE 3408 SDR 13.5					
PULGADAS					
2	4	6	8	10	12
METROS LINEALES					
347.0	9,645.0	7,120.0	750.0	2,550.0	1,110.0









Puntos 71

ΔP/100m 0.20 PSiG  
P. atm. 10.48 PSiG  
P. CC 100.0 PSiG  
LEQA 1.0 m  
Pres. Min. 90.0 PSiG

ASTM SDR 13.5  
Ventilacion Alirnak  
Escenario 1

Guardar escenario  
Limpiar  
Evaluar línea  
Listado de tuberías  
Linea critica

Recuperar escenario  
Calcular  
Generar grafos  
Listado de accesorios

Datos de entrada										Sin factor de similitud.										Cons. factor similitud.										MIXO				Nodo final		
I	J	L	Φn	Ks	Q	Qs	P	Q	P	ΔP	Φn	Φint.	Q	P	ΔP	Φn	Φint.	P	AP	Etiqueta	Nivel	Estado														
m	adig	sCFM	sCFM	PSiG	sCFM	PSiG	sCFM	PSiG	sCFM	PSiG	pub.	pub.	sCFM	PSiG	PSiG	pub.	pub.	PSiG	PSiG																	
2	44	653.0	12.00	0.00	0.0	0.0	2.330.0	93.18	0.1702	12.0	10.785	98.1.0	90.63	0.0344	12.0	10.786	90.63	0.0344	BM RP 1																	
44	45	771.2	10.00	0.00	0.0	0.0	2.330.0	93.01	0.4682	10.0	9.094	98.1.0	90.60	0.0945	10.0	9.094	90.60	0.0945																		
45	46	424.4	8.00	0.00	0.0	0.0	2.330.0	92.54	0.7760	8.0	7.296	98.1.0	90.50	0.1555	8.0	7.296	90.50	0.1555																		
46	47	703.9	6.00	0.00	0.0	0.0	1.100.0	91.40	1.1997	6.0	5.604	465.0	90.29	0.2440	6.0	5.604	90.29	0.2440																		
47	48	111.4	6.00	0.00	0.0	0.0	930.0	90.20	0.1402	6.0	5.604	397.0	90.04	0.0290	6.0	5.604	90.04	0.0290	RP 990																	
48	49	50.0	6.00	0.43	930.0	397.0	930.0	90.06	0.0536	6.0	5.604	397.0	90.01	0.0132	6.0	5.604	90.01	0.0132	SM 120																	
49	50	339.1	4.00	0.40	170.0	68.0	1.230.0	90.13	0.1265	4.0	3.807	68.0	90.02	0.0232	4.0	3.807	90.02	0.0232																		
50	51	322.0	8.00	0.00	0.0	0.0	1.230.0	91.76	0.1807	8.0	7.296	516.0	90.34	0.0362	8.0	7.296	90.34	0.0362																		
51	52	47.2.1	0.00	0.00	0.0	0.0	890.0	91.58	0.5441	6.0	5.604	380.0	90.31	0.1127	6.0	5.604	90.31	0.1127	CH																	
52	53	108.0	4.00	0.00	0.0	0.0	380.0	91.04	0.1824	4.0	3.807	156.0	90.19	0.0345	4.0	3.807	90.19	0.0345																		
53	54	22.9	2.00	1.00	20.0	20.0	20.0	90.00	0.0041	2.0	2.009	20.0	90.00	0.0041	2.0	2.009	90.00	0.0041	Taller																	
54	55	220.7	4.00	0.00	0.0	0.0	340.0	90.87	0.2972	4.0	3.807	136.0	90.16	0.0545	4.0	3.807	90.16	0.0545	CX 072																	
55	56	378.2	4.00	0.00	0.0	0.0	340.0	90.58	0.5083	4.0	3.807	136.0	90.11	0.0933	4.0	3.807	90.11	0.0933	RP 029																	
56	57	50	4.00	0.4	340	136.0	340.0	90.07	0.0684	4.0	3.807	136.0	90.01	0.0125	4.0	3.807	90.01	0.0125																		
57	58	137.48	6.00	0.0	0.0	0.0	530.0	90.67	0.0511	6.0	5.604	224.0	90.14	0.0124	6.0	5.604	90.14	0.0124																		
58	59	298.81	4.00	0.0	0.0	0.0	170.0	90.13	0.1115	4.0	3.807	68.0	90.02	0.0205	4.0	3.807	90.02	0.0205	RP 227																	
59	60	50	4.00	0.4	170	69.0	170.0	90.02	0.0190	4.0	3.807	68.0	90.00	0.0035	4.0	3.807	90.00	0.0035																		
60	61	289.95	0	0	0	0	360.0	90.61	0.4335	4.0	3.807	156.0	90.13	0.0923	4.0	3.807	90.13	0.0923																		
61	62	430.78	4.00	0	0	0	170.0	90.18	0.1505	4.0	3.807	68.0	90.03	0.0295	4.0	3.807	90.03	0.0295																		
62	63	50	4.00	0.4	170	68.0	170.0	90.02	0.0190	4.0	3.807	68.0	90.00	0.0035	4.0	3.807	90.00	0.0035																		
63	64	102.92	4.00	0	0	0	190.0	90.1259	0.0475	4.0	3.807	88.0	90.03	0.0114	4.0	3.807	90.03	0.0114																		
64	65	19.17	2.00	1	20	20.0	20.0	90.00	0.0035	2.0	2.009	20.0	90.00	0.0035	2.0	2.009	90.00	0.0035	SA Profundización																	
65	66	151.5	4.00	0.00	0.0	0.0	170.0	90.08	0.0504	4.0	3.807	68.0	90.01	0.0111	4.0	3.807	90.01	0.0111																		
66	67	50.0	4.00	0.40	170.0	68.0	170.0	90.02	0.0190	4.0	3.807	68.0	90.00	0.0035	4.0	3.807	90.00	0.0035	RP 060																	
67	68	503.7	0.00	0.00	0.0	0.0	340.0	91.07	0.6765	4.0	3.807	136.0	90.20	0.1242	4.0	3.807	90.20	0.1242	RP 155																	
68	69	81.8	4.00	0.00	0.0	0.0	170.0	90.05	0.0308	4.0	3.807	68.0	90.01	0.0056	4.0	3.807	90.01	0.0056																		
69	70	50.0	4.00	0.40	170.0	68.0	170.0	90.02	0.0190	4.0	3.807	68.0	90.00	0.0035	4.0	3.807	90.00	0.0035																		
70	71	1.054.3	4.00	0.40	170.0	68.0	170.0	90.00	0.3961	4.0	3.807	68.0	90.07	0.0727	4.0	3.807	90.07	0.0727	SCB																	

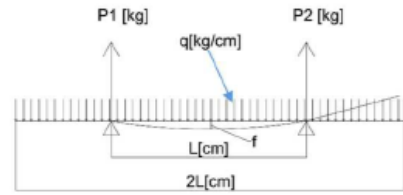
INVENTARIO DE TUBERIAS ACTUAL, MODIFICADA,  
AMPLIADA Y OPTIMIZADA

HDPE ASTM F714 PE 3408 SDR 13.5											
PULGADAS											
2	4	6	8	10	12						
METROS LINEALES											
347.0	9,645.0	7,120.0	750.0	2,550.0	1,110.0						

**ANEXO 9: SOPORTES PARA TUBERÍA HDPE SDR 13.5 10 PULGADAS**

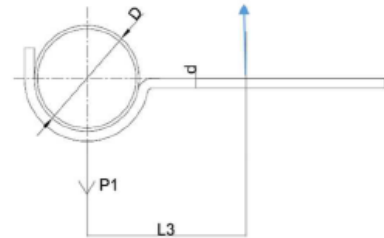
DATOS TUBERIA HDPE 10"

Dn	OD		SDR	ID		PESO
Inch	Inch	mm		Inch	mm	kg/m
10	10.750	273.05	13.5	9.094	231.0	14.0
PESO DEL AGUA						0.0
PESO TOTAL						14.0



PIPE DATA HDPE PE 4710

Tensión de rotura		351.0	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de diseño		110.4	kg/cm <sup>2</sup>
Modulo de elasticidad		2069.0	kg/cm <sup>2</sup>
Carga distribuida	q=	0.1403	kg/cm
Distancia entre apoyos	L=	300	cm
Momento de flexión	Mmax=	6,313.50	kg.cm
Momento axial de resistencia	Ix=	13,308.80	cm <sup>4</sup>
<b>Flecha de flexión</b>	f=	8.60	mm



Resultante P1 y P2	P 1,2=	42.09	kg
Distancia entre caja de la Ga y el	L3=	40	cm
Diámetro del soporte	d=	3.175	cm
Momento max flexor	Mmax=	1,683.60	Kgcm
Momento de inercia	Wx=	3.14	cm <sup>3</sup>
Tensión de flexión	σ=	337.52	kg/c <sup>2</sup>
Limite de flexión	[σ]=	2,500.00	kg/c <sup>2</sup>
Mto. de resistenci de la barra	Ixr=	4.99	cm <sup>4</sup>
Módulo de elasticidad del acero	E=	2,100,000	kgc/cm <sup>2</sup>
Flecha de flexión	f1=	0.09	cm

1.25 pulg

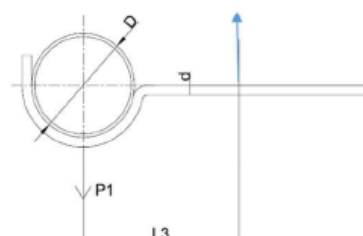
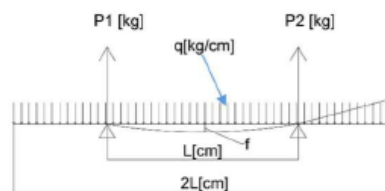
Lte fluencia al cizallamiento	[τ]=	1650.00	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de cizallamiento	τ=	5.32	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión equivalente	σeq=	337.68	kg/cm <sup>2</sup>

Factor de seguridad	n=	7.40	
---------------------	----	------	--



### ANEXO 10: SOPORTES PARA TUBERÍA HDPE SDR 13.5 8 PULGADAS

DATOS TUBERIA HDPE 8"						
Dn	OD		SDR	ID		PESO
Inch	Inch	mm		Inch	mm	kg/m
8	8.625	219.08	13.5	7.296	185.3	10.3
PESO DEL AGUA						0.0
PESO TOTAL						10.3
PIPE DATA HDPE PE 4710						
Tensión de rotura				351.0	kg/cm <sup>2</sup>	
Tensión de diseño				110.4	kg/cm <sup>2</sup>	
Modulo de elasticidad				2069.0	kg/cm <sup>2</sup>	
Carga distribuida			q=	0.1027	kg/cm	
Distancia entre apoyos			L=	300	cm	
Momento de flexión			Mmax=	4,621.50	kg.cm	
Momento axial de resistencia			Ix=	5,518.13	cm <sup>4</sup>	
Flecha de flexión			f=	15.18	mm	
Resultante P1 y P2			P 1,2=	30.81	kg	
Distancia entre caja de la Ga y el			L3=	40	cm	
Diámetro del soporte			d=	2.54	cm	
Momento max flexor			Mmax=	1,232.40	Kgcm	
Momento de inercia			Wx=	1.61	cm <sup>3</sup>	
Tensión de flexión			σ=	603.18	kg/c <sup>2</sup>	
Limite de flexión			[σ]=	2,500.00	kg/c <sup>2</sup>	
Mto. de resistenci de la barra			Ixr=	2.04	cm <sup>4</sup>	
Módulo de elasticidad del acero			E=	2,100,000	kgc/cm <sup>2</sup>	
Flecha de flexión			f1=	0.15	cm	
lte fluencia al cizallamiento			[τ]=	1650.00	kg/cm <sup>2</sup>	
Tensión de cizallamiento			τ=	6.08	kg/cm <sup>2</sup>	
Tensión equivalente			σeq=	603.30	kg/cm <sup>2</sup>	
Factor de seguridad			n=	4.14		

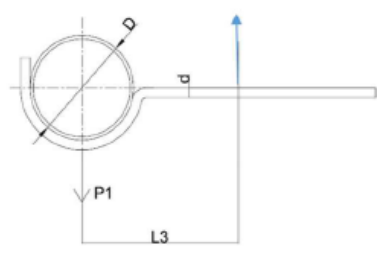
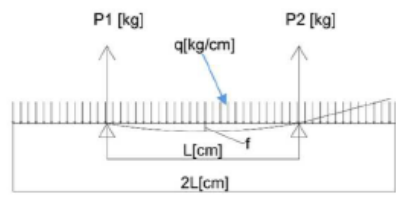


1 pulg



**ANEXO 11: SOPORTES PARA TUBERÍA HDPE SDR 13.5 6 PULGADAS**

DATOS TUBERIA HDPE 6"						
Dn	OD		SDR	ID		PESO
Inch	Inch	mm		Inch	mm	kg/m
6	6.625	168.28	13.5	5.604	142.3	6.1
PESO DEL AGUA						0.0
PESO TOTAL						6.1
PIPE DATA HDPE PE 4710						
Tension de rotura				351.0		kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de diseño				110.4		kg/cm <sup>2</sup>
Modulo de elasticidad				2069.0		kg/cm <sup>2</sup>
Carga distribuida			q=	0.0606		kg/cm
Distancia entre apoyos			L=	300		cm
Momento de flexión			Mmax=	2,727.00		kg.cm
Momento axial de resistencia			Ix=	1,921.39		cm <sup>4</sup>
Flecha de flexión			f=	25.72		mm
Resultante P1 y P2			P 1,2=	18.18		kg
Distancia entre caja de la Ga y el			L3=	40		cm
Diámetro del soporte			d=	1.905		cm
Momento max flexor			Mmax=	727.20		Kgcm
Momento de inercia			Wx=	0.68		cm <sup>3</sup>
Tensión de flexión			σ=	1,124.87		kg/c <sup>2</sup>
Limite de flexión			[σ]=	2,500.00		kg/c <sup>2</sup>
Mto. de resistenci de la barra			Ixr=	0.65		cm <sup>4</sup>
Módulo de elasticidad del acero			E=	2,100,000		kgc/cm <sup>2</sup>
Flecha de flexión			f1=	0.29		cm
Lte fluencia al cizallamiento			[τ]=	1650.00		kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de cizallamiento			τ=	6.38		kg/cm <sup>2</sup>
Tensión equivalente			σeq=	1124.95		kg/cm <sup>2</sup>
Factor de seguridad			n=	2.22		



0.75 pulg



### ANEXO 12: SOPORTES PARA TUBERÍA HDPE SDR 13.5 4 PULGADAS

DATOS TUBERIA HDPE 4"

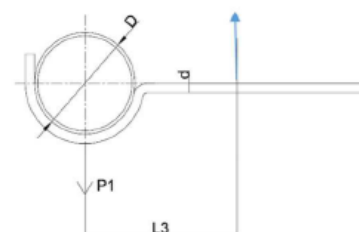
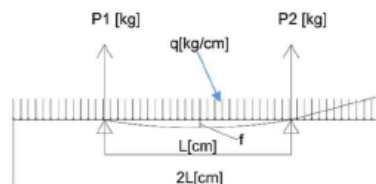
Dn	OD		SDR	ID		PESO
Inch	Inch	mm		Inch	mm	kg/m
4	4.500	114.3	13.5	3.807	96.7	2.8
PESO DEL AGUA						0.0
PESO TOTAL						2.8

PIPE DATA HDPE PE 4710

Tensión de rotura		351.0	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de diseño		110.4	kg/cm <sup>2</sup>
Modulo de elasticidad		2069.0	kg/cm <sup>2</sup>
Carga distribuida	q=	0.0280	kg/cm
Distancia entre apoyos	L=	250	cm
Momento de flexión	Mmax=	875.00	kg.cm
Momento axial de resistencia	Ix=	408.61	cm <sup>4</sup>
<b>Flexión de flexión</b>	f=	26.95	mm

Resultante P1 y P2	P 1,2=	7.00	kg
Distancia entre caja de la Ga y el	L3=	40	cm
Diámetro del soporte	d=	1.5875	cm
Momento max flexor	Mmax=	280.00	Kgcm
Momento de inercia	Wx=	0.39	cm <sup>3</sup>
Tensión de flexión	σ=	898.12	kg/c <sup>2</sup>
Limite de flexión	[σ]=	2,500.00	kg/c <sup>2</sup>
Mto. de resistenci de la barra	Ixr=	0.31	cm <sup>4</sup>
Módulo de elasticidad del acero	E=	2,100,000	kgc/cm <sup>2</sup>
Flexión de flexión	f1=	0.23	cm

Lte fluencia al cizallamiento	[τ]=	1650.00	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión de cizallamiento	τ=	3.54	kg/cm <sup>2</sup>
Tensión equivalente	σeq=	898.15	kg/cm <sup>2</sup>
Factor de seguridad	n=	2.78	



0.625 pulg



### ANEXO 13: DISEÑO DEL SOPORTE VIGA PARA CHIMENEA

