

Universidad de Ingeniería y Tecnología

## TESIS DE PREGRADO

### Mejora a la metodología de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en operaciones mineras en gran altitud

Sánchez Sarmiento, Luis Antonio

*Award date:*  
2019

[Link to publication](#)

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Ingeniería Mecánica**



**Mejora a la Metodología de  
Dimensionamiento de Redes de Suministro de  
Aire Comprimido en Operaciones Mineras en  
Gran Altitud**

**Improvement to The Sizing Methodology of  
Compressed Air Supplying Network in Mining  
Operations at High Altitude**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**Luis Antonio Sánchez Sarmiento**

**Código 201310010**

**Asesor**

**José Cesar Ramos Saravia**

Lima – Perú

Octubre 2019

La tesis

Mejora a la Metodología de Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido en Operaciones Mineras en Gran Altitud ha sido aprobada por:

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

[Nombres y apellidos del Asesor de la tesis]

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

Dedicatoria:

A mis padres y abuelos, por apoyarme y aconsejarme en todas las etapas de mi vida, por ayudarme a no perder mi visión y por enseñarme a ser perseverante con sus ejemplos.

### Agradecimientos:

Agradezco a mi familia, pareja, amigos y profesores del departamento de mecánica y energía; especialmente al Phd José Ramos y al Ing. Luigi Sassarini, a todos por ayudarme a aclarar el tema, por comprenderme y apoyarme en todo el tiempo de elaboración de esta tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>18</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
Antecedentes.....	22
Justificación y motivación.....	24
Objetivo general .....	26
Objetivos específicos.....	26
Alcance de la Tesis.....	27
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
1.1. Fundamentos Físicos de la Metodología Propuesta .....	28
1.1.1. Conservación de la Masa y la Energía.....	28
1.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento.....	28
1.1.3. Relación entre Energía y masa .....	30
1.2. Mecánica de Fluidos .....	31
1.2.1. Viscosidad dinámica.....	31
1.2.2. Viscosidad cinemática .....	32
1.2.3. Ecuación de Bernoulli.....	33
1.2.4. Número de Reynolds .....	33
1.2.5. Ecuación de Darcy.....	35
1.2.6. Ecuación De Hage-Poiseuille .....	36
1.2.7. Rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) .....	36
1.3. Aire Comprimido.....	37

1.4.	Dimensionamiento De La Red De Suministro De Aire Comprimido .....	38
1.4.1.	Parámetros de diseño de la red de suministro de aire comprimido .....	39
1.5.	Caída De Presión .....	41
1.6.	Factor por altura.....	42
<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b>		<b>43</b>
2.1.	Metodología Tradicional de Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido.....	43
2.1.1.	Cálculo de la demanda a condiciones estándar.....	44
2.1.2.	Geometría y dimensionamiento de la red de suministro .....	46
2.1.3.	Selección de Componentes de la Red .....	47
2.1.4.	Cálculo de las Caídas de Presión .....	47
2.1.5.	Cálculo del costo de explotación .....	48
2.2.	Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido en Altura con Metodología Tradicional.....	48
2.3.	Metodología Mejorada para el Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido en Altura.....	51
2.3.1.	Cálculo de la demanda en función al flujo másico en condiciones estándar.....	52
2.3.2.	Cálculo de la caída de presión con metodología mejorada.....	52
2.3.3.	Selección del diámetro óptimo .....	54
<b>CAPÍTULO III APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA MEJORADA.....</b>		<b>55</b>
3.1.	CASO 1: Dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido para operaciones en minería subterránea.....	55
3.1.1.	Dimensionamiento de red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología tradicional en condiciones estándar .....	58

3.1.2.	Dimensionamiento de la red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología Tradicional en gran altitud .....	62
3.1.3.	Dimensionamiento de red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología Mejorada en gran altitud .....	65
3.1.4.	Análisis de Resultados .....	72
3.2.	CASO 2: Dimensionamiento de redes de suministro de aire para la operación de Celdas de Flotación en Plantas Concentradoras de Cu.....	74
3.2.1.	Dimensionamiento de la red de suministro de aire empleando la Metodología Tradicional en Condiciones Estándar .....	74
3.2.2.	Dimensionamiento de la red de suministro de aire empleando la Metodología Tradicional en gran altitud.....	79
3.2.3.	Dimensionamiento de la red de suministro aire empleando la Metodología Mejorada en gran altitud.....	82
	Dimensionamiento de la línea principal, tramo I-P.....	83
3.2.4.	Análisis de Resultados .....	84
3.3.	Variación de la demanda con la Temperatura Ambiental .....	85
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>89</b>
	<b>TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>99</b>
7.1.	Material de las tuberías de distribución .....	101
7.1.1.	Aluminio .....	101
7.1.1.	Acero Inoxidable .....	102
7.2.	Sistemas de control y regulación del compresor .....	102

7.2.1.	Todo/ Nada .....	102
7.2.2.	Variadores de Velocidad.....	103
7.3.	Minería Subterránea.....	104
7.4.	Operaciones en Minería Subterránea.....	104
7.4.1.	Perforación.....	105
7.4.2.	Carga explosiva explosivo .....	105
7.4.3.	Voladura .....	106
7.4.4.	Ventilación.....	106
7.4.5.	Desescombros.....	106
7.4.6.	Saneamiento.....	107
7.4.7.	Shotcrete .....	108
7.4.8.	Empernado .....	108
7.5.	Minería a Tajo Abierto .....	109
7.6.	Operaciones en Minería Superficial .....	109
7.7.	Planta Concentradora de Minerales .....	110
7.7.1.	Celdas de Flotación.....	110
7.8.	Leyes de los Gases.....	111
7.8.1.	Ley de Boyle-Mariote.....	111
7.8.2.	Ley de Charles y Gay Lussac .....	112
7.8.3.	Ley de Amonton .....	113
7.8.4.	Ley de Dalton .....	115
7.8.5.	Ley de Amagat.....	115
7.8.6.	Ley de los Cambios Triples .....	116

7.8.7.	Ley de Avogadro .....	116
7.8.8.	Ley de Poisson.....	117
7.8.9.	Ley ecuación de Clapeyron .....	117
7.9.	Procesos Termodinámicos .....	118
7.9.1.	Proceso Isotérmico: .....	118
7.9.2.	Proceso Isobárico.....	119
7.9.3.	Proceso Isocórico.....	119
7.9.4.	Proceso Adiabático .....	119
7.9.5.	Proceso Cuasiestático .....	120
7.10.	Transferencia de calor.....	120
7.10.1.	Conducción .....	120
7.10.2.	Convección .....	121
7.11.	Flujo Incompresible .....	122
7.12.	Compresores .....	122
7.12.1.	Compresores Dinámicos .....	122
7.12.2.	Compresores De Desplazamiento Positivo.....	123
7.13.	Motor Neumático.....	123
7.14.	Cilindro Neumático .....	124
7.15.	Válvulas .....	124
7.16.	Taladro de Roca, Stoper y Jack Leg .....	125
7.17.	Propiedades del aire a diferentes condiciones .....	126
7.18.	Costos de inversión.....	127

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rugosidad de algunos materiales. ....	37
Tabla 1.2 Parámetros de Diseño de la red de distribución de aire comprimido. ....	39
Tabla 2.1. Condiciones Estándar. Fuente: [35]. ....	45
Tabla 2.2. Representación de la demanda del caudal y presión. ....	45
Tabla 2.3. Cálculo de la caída de presión para diferentes diámetros. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 2.4. Consolidado de fórmulas a utilizar en metodología mejorada. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 3.1 Consideraciones de operación e instalación en el modelo de mina.....	55
Tabla 3.2 Cálculo de la demanda de aire. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Tabla 3.3 Demando de aire comprimido considerando desgaste y fugas en el sistema Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 3.4. Condiciones de Frontera para el nodo A en el primer tramo. ....	59
Tabla 3.5. Condiciones de Frontera para el nodo D en el primer tramo. ....	59
Tabla 3.6. Comparación de Resultados de método tradicional y software. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 3.7 Costo de explotación para cada diámetro de tubería. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Tabla 3.8 Diseño de la red de distribución en condiciones estándar. Fuente: Elaboración propia. ....	61
Tabla 3.9. Caída de presión, costo de instalación, de operación y anual para el tramo A-D. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 3.10. Condiciones ambientales en altura. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 3.11 Caudal real en altura. Fuente: Elaboración Propia. ....	63
Tabla 3.12. Diseño de la red de distribución en altura, a 3800 m, con metodología tradicional. ....	64

Tabla 3.13. Costo de explotación de la red de suministro en altura. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 3.14. Demanda de flujo másico para cada tipo de equipo neumático. ....	66
Tabla 3.15 Característica del cilindro modelado. Fuente: Elaboración propia. ....	69
Tabla 3.16 Condiciones de frontera para la simulación del primer tramo. Fuente: Elaboración Propia. ....	69
Tabla 3.17 Presiones a la salida y a la entrada de la tubería simulada y caída de presión. Fuente: Elaboración Propia. ....	70
Tabla 3.18. Diseño de red de distribución en altura, a 3800 m con metodología propuesta Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 3.19. Costo de explotación de la red de suministro con metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 3.20. Costos de las tres metodologías. Fuente: Elaboración propia .....	73
Tabla 3.21. Cálculo de la demanda de aire en las celdas de flotación. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Tabla 3.22. Longitud de tramos del esquema de la Fig 3.11. Fuente: Elaboración propia. ....	75
Tabla 3.23. Resultados de la caída de presión y costos de instalación y operación. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 3.24. Costo de explotación del sistema de suministro con metodología tradicional. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 3.25. Condiciones ambientales del caso en altura. Fuente: Elaboración propia... 79	
Tabla 3.26. Cálculo de la demanda en condiciones reales. Fuente: Elaboración propia.79	
Tabla 3.27. Costo de explotación del sistema con metodología tradicional. Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla 3.28, Costo de explotación del sistema con metodología mejorada. Fuente: Elaboración propia.....	84
Tabla 3.29. Análisis de resultados de CASO 2. Fuente: Elaboración propia. ....	85

Tabla 7.1 Costos de tuberías de aluminio. Fuente: Precios proporcionados por Ing. José Cavassa..... 127

Tabla 7.2 Costos de compresor de tornillo..... 128

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.1. Representación de la cantidad de movimiento en un motor neumático. Fuente: [22]. .....	29
Fig 1.2 Representación de las capas de velocidad en un fluido viscoso. ....	31
Fig 1.3 Representación de la aplicación de la ecuación de Bernoulli en una tubería con reducción de diámetro. ....	33
Fig 1.4 Partes de una red de distribución de aire comprimido .....	38
Fig 2.1 Esquema de la Metodología Tradicional de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en condiciones estándar. Fuente: Elaboración propia. .	44
Fig. 2.2. Esquema de la Metodología tradicional de dimensionamiento de redes de aire comprimido en altura. Fuente: Elaboración propia. ....	50
Fig 2.3. Esquema de la Metodología mejorada para el dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en altura. Fuente: Elaboración propia.....	51
Fig 2.4. Modelo de curva del costo de explotación vs diámetro nominal. Fuente: Elaboración propia.....	54
Fig 3.1. Galería de una mina subterránea. Fuente: [38] .....	55
Fig 3.2. Modelo de mina a evaluar en la presente tesis .....	57
Fig 3.3 Caída de presión vs diámetro interno en el tramo A-D de la mina modelo a nivel del mar. ....	58
Fig 3.4 Diagrama del primer tramo de la red de distribución de aire comprimido en condiciones estándar en el programa Flownex. ....	59
Fig 3.5 Caída de presión vs diámetro interno para el tramo A-D de la mina modelo a 3800 m de altitud. Fuente: Elaboración propia.....	63
Fig 3.6 Número de Reynolds para cada diámetro de tubería en el tramo A-D del modelo de mina utilizando la metodología mejorada. Fuente: Elaboración propia. ....	67
Fig 3.7 Caída de presión vs diámetro interno para el primer tramo del modelo de mina a 3800 m de altitud utilizando la metodología propuesta.....	68

Fig 3.8 Enmallado del cilindro que se simuló con diámetro 253.45 mm y 5 m de largo. .....	69
Fig 3.9 Gráfica caída de presión (psi) vs distancia longitud de la tubería.....	70
Fig. 3.10. Celdas de flotación. Fuente [39] .....	74
Fig 3.11. Esquema de etapas de Celdas de Flotación.....	76
Fig 3.12. Caída de presión vs diámetro para la línea principal en condiciones estándar. Fuente: Elaboración propia.....	77
Fig 3.13. Costo de explotación vs diámetro nominal para la línea principal en condiciones estándar: Fuente: Elaboración propia. ....	78
Fig 3.14. Caída de presión vs diámetro interno para la línea principal con metodología tradicional. Fuente: Elaboración propia.....	80
Fig 3.15. Costo anual de explotación vs diámetro nominal de la tubería principal con método tradicional. ....	81
Fig 3.16. Caída de presión vs diferentes diámetros nominales para la línea principal con metodología mejorada. ....	83
Fig 3.17. Costo anual de explotación vs diámetro nominal de la tubería principal con metodología mejorada. ....	84
Fig 3.18. Variación de la temperatura en un día.....	86
Fig 3.19. Demanda de aire comprimido (en porcentaje) vs horas de trabajo en el día. Fuente: [39]. ....	87
Fig 3.20. Demanda de aire (cfm) y temperatura ambiental vs horas de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	88
Fig 7.1 Comparación entre una tubería de acero y una tubería de aluminio después de su uso.....	102
Fig 7.2 Demanda de Aire y Consumo de energía respecto al tiempo utilizando técnica todo/ nada. ....	103
Fig 7.3 Regulación de presión con técnica Todo/Nada. ....	103
Fig 7.4 Demanda de Aire y Consumo de Energía respecto al tiempo utilizando variadores de velocidad.....	104

Fig 7.5 Ciclo de operaciones para realizar túneles en minería subterránea.....	105
Fig 7.6 Pala Neumática.....	107
Fig 7.7 Máquina de purgado mecánico de túneles para mina. ....	107
Fig 7.8 Lanzamiento de shotcrete.....	108
Fig 7.9 Empernado en túnel.....	108
Fig 7.10. Mina a tajo abierto.....	109
Fig 7.11. Ciclo de operaciones en minería a tajo abierto. Fuente: Rock Blasting, Universidad Nacional de Ingeniería, Dr. Carlos Agreda Turñate [57].....	110
Fig 7.12. Celda de flotación mecánica. ....	111
Fig 7.13 Gráfica de la Ley de Boyle. Presión vs Volumen a Temperatura constante..	112
Fig 7.14 Gráfica de la Ley de Charles y Gay Lussa. Temperatura vs Volumen a Presión constante. ....	113
Fig 7.15 Gráfica de la Ley de Amonton. Presión vs Temperatura a volumen constante. .....	114
Fig 7.16 Representación de la Ley de Dalton. La presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales. ....	115
Fig 7.17 Representación de la Ley de Amagat. El volumen total de una mezcla de gases es la suma de los volúmenes parciales. ....	116
Fig 7.18 Representación de un sistema isotérmico. La energía ganada con el trabajo de una fuerza se disipa en forma de calor. ....	118
Fig 7.19 Diagrama Presión vs Volumen de un proceso isotérmico. ....	118
Fig 7.20 Representación de un proceso isobárico en el diagrama presión vs volumen. .....	119
Fig 7.21 Representación gráfica de un proceso isocórico en el diagrama presión vs volumen. ....	119
Fig 7.22 Representación de un proceso adiabático. Aumento de presión sin intercambio de calor con el entorno.....	120
Fig 7.23 Representación de un proceso adiabático. Diagrama presión volumen. ....	120
Fig 7.24 Compresores dinámicos. (a) Compresor Radial. (b) Compresor eyector. ....	123

Fig 7.25 Compresores de desplazamiento positivo. (a) Compresor de pistón de simple efecto. (b) Compresor de tornillos.....	123
Fig 7.26 Motor neumático de paletas. ....	124
Fig 7.27 Cilindro neumático de simple efecto con retorno. ....	124
Fig 7.28 Tipos de válvulas. (a) Válvula direccional. (b) Válvula distribuidora. (c) Valvular reguladora de Velocidad.....	125
Fig 7.29 Equipo Neumático. Rock drill Stoper. (a) Utilización del equipo en minería subterránea. (b) Rock Drill Stoper.....	125
Fig 7.30 Mecanismo de funcionamiento de un stoper.....	126
Fig 7.31 Función información de función .....	126
Fig 7.32. Ventana de dialogo.....	127

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Glosario de Términos.....	99
Anexo 2. Marco Teórico.....	101
Anexo 3. Producto Bruto Interno Trimestral por Grandes Actividades Económicas: 2007 – 2017 .....	129
Anexo 4 Producción Minera Metálica de Oro. 2017/2016- Ministerio de Energía y Minas .....	130
Anexo 5. Diagrama de Moody para flujos completamente desarrollados. Transferencia de Calor y Masa, Cengel 4 Edición.....	131
Anexo 6. Esquema del modelo de mina en Flownex .....	132
Anexo 7. Resultados de la caída de presión para el primer tramo de la mina modelo a nivel del mar. ....	133
Anexo 8. Resultados de la caída de presión para el primer tramo de la mina modelo a 3800 m de altitud con modelo clásico. ....	133
Anexo 9 Resultados de la caída de presión para el primer tramo del modelo de mina a 3800 m de altitud utilizando la metodología propuesta.....	134
Anexo 10. Resultados económicos para el caso 1.2 GA-160.....	134
Anexo 11. Resultados económicos para el caso 1.3 GA-110 VSD.....	135
Anexo 12. Resultados económicos para el caso 2.1 GA-315 200 psi y GA 110 VSD 200 psi .....	135
Anexo 13. Resultados económicos para el caso 2.2 GA-355 y GA 110 VSD 200 psi	136
Anexo 14. Resultados económicos para el caso 3.1 GA-315 200 psi y GA 110 VSD 200 psi .....	136
Anexo 15. Resultados económicos para el caso 3.2 GA-355 y GA 110 VSD 200 psi	137
Anexo 16. Temperaturas por hora del día 01 de Julio del 2018 en Orcopampa. Fig 3.18 .....	138
Anexo 17. Caudal al cien por ciento para cada temperatura .....	139
Anexo 18. Datos para la Fig 3.20 .....	140

## RESUMEN

Muchas de las redes de suministro de aire comprimido, que forman parte de la estructura de las operaciones mineras localizadas en grandes altitudes, están sobredimensionadas. Esto a causa de una metodología de dimensionamiento de redes que utiliza la conversión de SCFM (standar cubic feet per minute) a ACFM (actual feet per minute) que es poco preciso ya que son unidades volumétricas. Las cuales son sensibles a los cambios de temperatura y presión ambiental. Además, para el cálculo de la caída de presión se utiliza una fórmula simplificada pensada para los diseños de sistemas de aire comprimido en costa y con tuberías de aceros comerciales.

En la presente tesis se propone ajustar el caudal de aire comprimido necesario para un sistema de aire comprimido en grandes altitudes. Se propone lograr este objetivo utilizando una metodología mejorada que se fundamenta en la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para mantener la potencia de los equipos neumáticos y a su vez producir solo el flujo de aire comprimido necesario. Esta metodología emplea fórmulas con mayor precisión que las utilizadas en la metodología tradicional, considerando la rugosidad absoluta del material, así como el régimen del fluido para cada tramo de la red de aire comprimido. Para la comprobación de la eficiencia de la metodología se desarrollan dos casos de estudio. Los resultados se contrastan con un software comercial de diseño de redes de suministro de aire comprimido. Finalmente, se calculan los costos de explotación con ambas metodologías.

**Palabras Clave:** Operaciones Mineras, Gran Altitud, Metodología de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido, Conservación de la masa y de la cantidad de movimiento,

## **ABSTRACT**

Many of compressed air network that are part of mining operations structures located at high altitude are oversized. This due to a sizing methodology that convert SCFM (Standard cubic feet per minute) to ACFM (Actual cubic feet per minute) which has a poor accuracy because it is a volumetric unit. Which are very sensible to temperature and pressure changes. Additionally, a simplified formula for calculation of pressure drop is used but this formula was for designing in standard condition and steel.

In this thesis, it is proposed to calculate the real demand of compressed air for networks located at high altitudes. This object is done using an improved sizing methodology based on the mass and amount of movement. This methodology uses formula with more accuracy. Results of pressure drop are compared with the results of a software specialized. Finally, costs are calculated for both methodologies.

**Key words:** Mining Operations, High altitude, Compressed air networks sizing methodology, keep of mass and amount of movement.

## INTRODUCCIÓN

La minería es la actividad que tiene mayor impacto en la economía del Perú, aportando 67,000 millones de soles anualmente, lo cual representó el 14.4% del Producto Bruto Interno (PBI) a nivel nacional en el año 2017 [1].

En minería existen dos métodos de explotación: A tajo abierto y minería subterránea, siendo este último el método empleado en el 38% de las minas que operan en Perú [2] [3].

El 81.5% de las 30 principales minas que aportan al PBI del país se ubican a más de 3000 metros de altitud [4], pues la localización de los grandes yacimientos mineros coincide con las elevadas altitudes de la cordillera de los Andes. Algunas de las minas subterráneas que trabajan a mayor altitud y aportan en gran medida a la economía del país son: Buenaventura, con sus unidades Orcopampa (3200 m) y Julcani (4200 m), Compañía minera Ares con su unidad Acumulación Inmaculada (4900 m) y Panamerican Silver Huaron S.A. con su unidad Huaron (4500 m) [4] Mientras que para el caso de minas a tajo abierto están: Chinalco, Proyecto Toromocho (4700 m), Antamina (4300 m), Antapaccay (4200 m).

Por otro lado, la eficiencia mecánica de los equipos en altura es un problema para el beneficio económico de las minas y de las plantas de concentración de minerales. Esto debido a que la eficiencia se ve reducida y junto con ella la potencia nominal de los diferentes sistemas (combustión, eléctricos, electrónicos y neumáticos [5]). Lo que es más, los sistemas neumáticos son los más afectados debido a que el aire es el fluido de trabajo y en altura tiene propiedades físicas muy diferentes a las del aire en condiciones estándar [6].

Por otra parte los compresores son diseñados para una capacidad de succión FAD (free air delivery ) a cuales quiera sean las condiciones de entrada. Por lo tanto en términos de volumen, el flujo es el mismo a nivel del mar y en grandes altitudes [7]. No obstante,

la energía que se puede obtener del flujo volumétrico en altura es menor que del de la costa.

En este sentido, para que la productividad de la mina no se vea afectada, se trabaja con compresores de mayor tamaño que, incluso reduciendo su eficiencia por efecto de la altura, pueden satisfacer los requerimientos de presión y caudal de trabajo del sistema en diseño. Esta solución conlleva a un costo de operación de aproximadamente US\$ 1'203,040 anuales en términos de consumo eléctrico, trabajando a 80 Psi con 5818 cfm (pies cúbicos por minuto) a 4015 metros de altura [6].

Por otro lado, al trabajar con un compresor de mayor tamaño se tiene que diseñar la red de distribución para un mayor caudal de trabajo. Por lo tanto, los diámetros de las tuberías aumentan y con ello el costo de inversión e instalación. Adicionalmente, al haber mayor caudal, el costo de generación de aire comprimido aumentará por el costo del consumo de energía eléctrica.

Sobre los costos de inversión y operación de un compresor, el 73% es por generación de aire comprimido y solo el 19% es por inversión de compra [8]. Si a esto se adiciona que en altura el costo de generación de aire comprimido aumenta debido a la necesidad de un mayor caudal en compensación de la altura entonces el porcentaje por generación de aire comprimido aumenta de forma que se reduce el beneficio económico de las operaciones mineras. En general se tiene que por cada 1000 metros de altura el compresor pierde 10% de su eficiencia [5]. Entonces vemos que los costos de generación de aire comprimido tienen un gran impacto económico. Sin embargo, mejorar la eficiencia energética para la producción de aire comprimido no es el tema principal de la presente tesis.

Todos los problemas antes mencionados siempre han existido y afectan principalmente a los países que se encuentran en la cordillera de los Andes, como: Venezuela, Argentina, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile.

Debido a que son pocos los países afectados por este problema, no se han desarrollado muchas investigaciones para dar solución a la disminución de la eficiencia energética. Actualmente existen solo cuatro investigaciones que se enfocan

principalmente en: Ahorro económico con la implementación de un programa de mantenimiento para reducir las fugas [6] [9]; cambio de compresoras de una sola etapa por otras compresoras de dos etapas [10] y diseño completo del sistema de aire comprimido para una mina subterránea utilizando una misma densidad para la red [11].

En este sentido, la presente tesis busca mejorar la metodología de dimensionamiento de la red de suministro de aire comprimido en operaciones mineras ubicadas en gran altitud utilizando la conservación de masa y de la cantidad de movimiento. Ello se logra cambiando los parámetros de dimensionamiento en gran altitud, los cuales se propone sean: Caudal de aire en función al flujo másico, caída de presión y viscosidad del aire a altas presiones. De esta forma se mantiene el flujo másico a nivel del mar y en altura para mantener una misma cantidad de movimiento en los motores neumáticos de los equipos en la red de aire comprimido. A través de esta metodología se logran dos objetivos: El primero, equiparar, de manera más precisa, el caudal de aire comprimido generado a la demanda real de aire comprimido del sistema, reduciendo la caída de presión y, por lo tanto, el volumen de generación de aire comprimido, con la consecuente reducción de costos de generación por disminución del consumo eléctrico. El segundo, reducir el costo de inversión en la red de suministro debido a que con un cálculo más preciso se reduce el diámetro de tuberías de tal manera que se mantenga una caída de presión menor al 10%.

El flujo másico es un parámetro que hasta la actualidad no se ha utilizado como tal, ya que se utiliza el caudal volumétrico en su lugar. Como ya se mencionó, en lugares de gran altitud, es necesario aumentar el caudal de aire, el cual actualmente, se calcula con un factor por altura, basado en la ley de los cambios triples. No obstante, ha de saberse que esto se hace con la finalidad de mantener constante la energía que ingresa a los equipos, lo cual es reflejo de la cantidad de masa que ingresa. Concretamente, resulta conveniente trabajar directamente con el caudal másico pues se realizarían los cálculos con la cantidad de energía necesaria. Esta idea nace a partir de la conservación de masa y de energía para una unidad de pie cubico estándar (scfm) [12].

## **Antecedentes**

Dentro del ciclo de operación de minería subterránea se encuentra: perforación, carga de explosivo, voladura, ventilación, desescombro, saneo, bulonado (shotcrete) y empernado. Así el aire comprimido es utilizado en las actividades de perforación y desescombro.

Para la actividad de perforación, el aire comprimido solo es utilizado en el caso de la perforación manual que utiliza sistemas neumáticos para la perforación de roca en túneles de reducida sección [13]. Los principales equipos de perforación manual son el taladro hidráulico ajustable (jackleg hammer) y el martillo para realce (stoper).

Para la actividad de desescombro, el aire comprimido es utilizado en los sistemas neumáticos de equipos como pala neumática y winche neumático, para transportar el mineral al lugar designado.

Por otro lado, en las plantas concentradoras, el aire comprimido se usa en gran medida como medio recolector de minerales en las celdas de flotación de las diferentes etapas.

El principal problema de los sistemas de aire comprimido en gran altitud es que estos reducen su potencia nominal, por lo que los equipos neumáticos también pierden potencia de trabajo. Esto trae como consecuencia menor productividad en la mina. En el caso de un jackleg, que funciona con un cilindro neumático, se requiere que el aire comprimido se acumule en la válvula de liberación y venza la presión establecida. Bajo las mismas condiciones, es decir mismo compresor y mismas tuberías, en altura esta función toma más tiempo.

De acuerdo con investigaciones nacionales sobre sistemas de aire comprimido en minas, las acciones que las empresas mineras vienen ejecutando para afrontar este problema son:

- Instalar un compresor de mayor tamaño utilizando un factor de compensación por altura en base a la aplicación de la “Ley de los cambios triples” [14]. Esta solución resulta ser costosa a lo largo del tiempo en

comparación a los costos a nivel de la costa, ya que tener instalado un compresor de mayor tamaño significa un mayor consumo de energía, lo que conlleva a un mayor costo de operación. Es decir, a mayor altura, mayor costo de operación de los sistemas neumáticos [6].

- Aumentar los diámetros a la dimensión requerida y comprar un compresor de mayor tamaño. Usualmente sucede que las empresas están en proceso de expansión y aumentan las cargas y flujo que circula por las tuberías que inicialmente fueron diseñadas para una menor demanda, teniendo como consecuencia altas caídas de presión (pérdida de energía). Esto se corrige realizando un proyecto que contemple la nueva carga y se calcule el diámetro óptimo para el flujo y presión que circula en ese momento por la red de distribución. [6], [10].
- Implementar sistemas de control de variación de velocidad, esto permite un correcto funcionamiento de los compresores para utilizar la energía necesaria [10], este sistema de control es conocido como accionamiento de velocidad variable (variable speed drive, VSD) para ATLAS COPCO. [15].
- Implementar un programa de control de fugas para reducir la producción de aire no necesaria [6].

Las investigaciones que existen actualmente sobre el dimensionamiento del sistema de suministro de aire comprimido en operaciones mineras ubicadas en gran altitud, se refieren principalmente al cálculo de los parámetros de dimensionamiento aplicando la ley general de los gases para las nuevas condiciones de presión a la altura requerida. Por el contrario, cuando se trata de hacer mejoras de diseño, las investigaciones contemplan un reemplazo de equipos antiguos por unos nuevos que tendrán un mejor rendimiento, además de implementar un sistema de control de velocidad variable para el compresor, lo cual produce mayor eficiencia y por lo tanto ahorro de energía. Otras investigaciones contemplan el cambio de todo el sistema de distribución, es decir de las

tuberías, por un sistema que tenga mejor performance con la nueva carga [16], debido a que las minas están en constante crecimiento.

En contraste, la presente tesis desarrolla simulaciones para determinar los parámetros de dimensionamiento que tienen mayor efecto en la caída de presión del sistema de suministro ubicados en gran altitud, en base al flujo másico que requiere, lo cual concluye en un modelamiento y dimensionamiento óptimo del sistema de distribución de aire comprimido.

### **Justificación y motivación**

El aire comprimido, en minería subterránea, se utiliza principalmente como fuente de energía para los equipos neumáticos de perforación y acarreo de materiales. La demanda de aire comprimido es ondulante, por lo que se deben tomar las consideraciones para satisfacer la demanda de aire con las características necesarias (presión y caudal), así como minimizar las fugas de aire y la caída de presión (pérdida de energía). Por otro lado, en las plantas de concentración, donde se separa el mineral por flotación, la demanda de aire es muy uniforme, debido a que es un proceso continuo y se realiza durante las 24 horas del día. En consecuencia, existe una gran y constante demanda de aire.

La generación de aire comprimido es un proceso que demanda una gran cantidad de energía eléctrica, representando aproximadamente el 15% de la energía consumida [17], por lo que la disminución en la generación de este permitiría una reducción en los costos de la operación minera.

Los sistemas de aire comprimido se dividen en tres etapas principales: Generación, suministro y carga.

En la generación, el compresor recibe la energía eléctrica de un motor y la transfiere al fluido (aire), aumentando su presión. Sin embargo, solo el 94% de la energía es calor utilizable, el 2% es una pérdida inevitable en forma de radiación térmica y el 4% es energía transmitida al fluido para su posterior generación de trabajo mecánico [5]. El calor recuperado se puede utilizar en sistemas de recuperación de calor como aire caliente,

aire para calefacción y agua caliente para procesos industriales, llegando a recuperar hasta el 50% del calor en el mejor de los casos [5], [18], [19].

Si bien las mayores pérdidas de energía se dan en la etapa de generación, los porcentajes de distribución de energía en esta etapa no varían pese al mejoramiento de la eficiencia del compresor, por lo tanto, los consumos de energía eléctrica del compresor siguen siendo los mismos. Por este motivo, la solución del problema debe ir en términos de ajustar el volumen de generación de aire comprimido a la demanda del sistema para el trabajo efectivo de los equipos neumáticos, disminuyendo así el consumo de energía eléctrica del proceso de generación.

Por otro lado, debido a que la demanda del aire comprimido es variable y a que los compresores operan con una velocidad nominal, se utiliza más energía de la requerida cuando la demanda es baja, teniendo como consecuencia una ineficiencia energética. Para disminuir la energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de los compresores se debe reducir las revoluciones; si esta última disminuye, la energía eléctrica para el funcionamiento de los compresores también. Esta reducción de revoluciones se logra con un VSD (variable speed drive).

Actualmente el VSD es la mejor herramienta para optimizar y reducir el uso de energía, ya que, al variar la velocidad del compresor variando la frecuencia eléctrica, el compresor usa la energía necesaria para satisfacer la demanda variable de aire. Sin embargo, esto no cambia el hecho de que la mejora se hace sobre el diseño de la red de distribución con la que se trabaje. Por consiguiente, si el dimensionamiento de la red de suministro no es el adecuado para las condiciones de trabajo, se presentarán grandes caídas de presión sin importar lo eficiente que sea el compresor [16]. Por otro lado, si se emplea un VSD sobre un buen diseño de red distribución, entonces se producirá un gran ahorro de energía.

Por lo expuesto anteriormente, la disminución en el consumo energético de los compresores, a través de la optimización del sistema de suministro, permitirá la reducción de costos tanto de inversión en la red como de operación del sistema.

Por otro lado, para el dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en gran altitud, se utiliza un factor de altura, el cual depende únicamente de la Ley de los cambios triples, lo cual hace un cálculo con un margen que no es necesario considerar. Por otro lado, si se mejoran los parámetros de dimensionamiento de las tuberías calculando adecuadamente el caudal real sin considerar factores o si se realizan los cálculos de necesidad considerando flujo másico en lugar de flujo volumétrico, se puede lograr una gran disminución de la caída de presión y del caudal requerido, con la consecuente disminución de consumo energético explicada anteriormente.

Por estas razones se propone reducir el costo del consumo eléctrico por generación de aire comprimido y el costo de inversión de la red de suministro, a partir de un correcto dimensionamiento de la red de suministro de aire comprimido utilizando el flujo másico para considerar únicamente la energía que necesitan los equipos neumáticos para trabajar con condiciones nominales.

### **Objetivo general**

- Desarrollar una metodología mejorada para el dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en operaciones mineras en grandes altitudes basada en la conservación de la energía y cantidad de movimiento.

### **Objetivos específicos**

- Desarrollar casos de estudio aplicando la metodología mejorada.
- Contrastar los resultados obtenidos con la metodología contra los resultados de la metodología tradicional.
- Evaluar la factibilidad técnica de la metodología mejorada.
- Evaluar la factibilidad económica de la metodología mejorada.

## **Alcance de la Tesis**

Los sistemas de suministro de aire comprimido están divididos en tres partes: generación de aire comprimido y acondicionamiento; suministro o distribución de aire comprimido a través de la red de tuberías y por último los usuarios o carga que son los equipos neumáticos que utilizan el aire comprimido para realizar un trabajo mecánico. La tesis se centra en el suministro de aire comprimido a través de la red de tuberías y las consideraciones que se debe tener en esta etapa.

De esta forma, la presente tesis propone mejorar la metodología de dimensionamiento de redes de suministro aire comprimido a través de un correcto cálculo del flujo volumétrico. Esto se logra utilizando al caudal másico como variable de cálculo en sistemas de suministro de aire comprimido de operaciones mineras ubicadas en gran altitud.

El análisis se desarrolla para la etapa de suministro del sistema de aire comprimido, que involucra desde el ingreso del aire comprimido a la tubería principal hasta las líneas de servicio.

En el aspecto técnico, los parámetros a analizar, que actualmente se utilizan en el sistema de aire comprimido, son la presión y caudal.

En el aspecto económico se evalúan los costos de inversión en la red de suministro producto de un cálculo más preciso del caudal de que debe circular por estos. Por último, se evalúan los costos del consumo energético de los compresores producto de la optimización de los parámetros del sistema de suministro en operaciones mineras ubicadas en gran altitud.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Fundamentos Físicos de la Metodología Propuesta

#### 1.1.1. Conservación de la Masa y la Energía

Si en un sistema se aplican fuerzas constantes, entonces se habla de una conservación de energía [20].

$$E_i = E_f \quad (1)$$

$$m_i = m_f \quad (2)$$

Donde:

$E_i$  = Energía en el primer escenario

$E_f$  = Energía en el segundo escenario

$m_i$  = Energía en el primer escenario

$m_f$  = Energía en el segundo escenario

Por otro lado, la energía es la medida de la capacidad que se tiene para realizar un trabajo [21]. Dicho de esta forma, la perforación en minería es un trabajo que se realiza con cierta cantidad de energía, la cual depende de la dureza de la roca.

#### 1.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento

Cuando la sumatoria de fuerzas sobre un objeto es nula, entonces la cantidad de movimiento permanece constante, ya que la fuerza es la derivada de la cantidad de movimiento respecto al tiempo [20]. La expresión cantidad de movimiento:

$$\sum F = 0 \quad (3)$$

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (4)$$

Donde:

$\vec{p}$  = Cantidad de movimiento ( $kg \cdot m/s$ )

$m$  = masa (kg)

$\vec{v}$  = velocidad vectorial ( $m/s$ )

Los equipos neumáticos (perforadoras neumáticas, winches neumáticos) utilizan motores neumáticos, véase Fig 0.1. Por ello la cantidad de movimiento que recibe el motor neumático debe ser la misma a nivel de mar y en altura para realizar un mismo trabajo. Es por este motivo que, al disminuir la densidad del aire en grandes altitudes, disminuye la cantidad de movimiento, el flujo másico y con ello la energía. En consecuencia, los equipos neumáticos requieren la misma cantidad de masa por unidad de tiempo, a nivel de mar y en gran altitud para que operen con la potencia nominal para el que fueron diseñados. Bajo esta premisa se desarrolla la metodología mejorada.

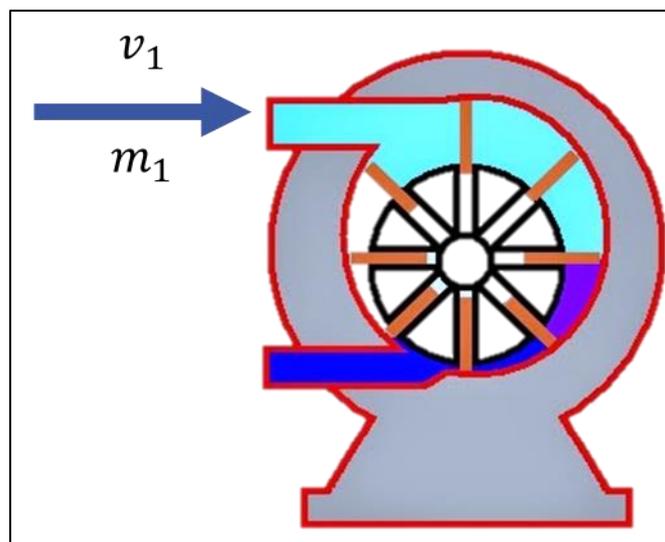


Fig 0.1. Representación de la cantidad de movimiento en un motor neumático. Fuente: [22].

### 1.1.3. Relación entre Energía y masa

De acuerdo a Einstein: “La masa de un cuerpo es una medida de su contenido en energía” [23]. El principio de equivalencia masa – energía se publicó en el libro “*Einstein 1905: un año milagroso*” en el cual se demuestra la siguiente ecuación para velocidades muy menores a la velocidad de la luz.

$$E = mc^2 \quad (5)$$

Donde:

$E =$  *Energía del cuerpo*

$m =$  *masa del cuerpo*

$c =$  *velocidad de la luz*

Dicho de esta manera, para el diseño de la red de distribución de aire comprimido, en condiciones estándar ingresa cierta cantidad de masa de aire que proporciona la energía necesaria para que los equipos trabajen en sus condiciones nominales. Por otro lado, en altura esta cantidad de masa de aire disminuye, en consecuencia, los equipos no trabajan en sus condiciones nominales, sino que trabajan con menor rendimiento, lo cual se refleja en una baja productividad de la mina. Esta es la teoría fundamental bajo la cual se desarrolla la metodología mejorada y que se debe tener presente a lo largo del desarrollo de esta tesis.

## 1.2. Mecánica de Fluidos

Rama de la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos tanto en movimiento, es decir que cuando se movilizan de un lugar a otro ya sea para accionar equipos o únicamente como almacenamiento; como en reposo [24].

### 1.2.1. Viscosidad dinámica

En todos los fluidos existe una propiedad que genera una fuerza que se opone al movimiento de este. Esta propiedad se llama viscosidad y es análoga al coeficiente de fricción en los sólidos. Es decir, a mayor viscosidad, mayor será la fuerza que se oponga al desplazamiento del fluido. Se define viscosidad como fuerza que se requiere para desplazar una unidad de área. Es decir, se produce un esfuerzo interno en el desplazamiento del fluido [25].

De la **Fig 0.2**, se cumple que el fluido tiene la misma velocidad que la superficie con la que está en contacto. Por lo tanto, se tienen diferentes velocidades en cada capa del fluido, siendo velocidad cero en la capa que está en contacto con la placa fija y siendo velocidad  $u_0$  en la capa que tiene contacto con la placa móvil. Se cumple que la tasa de cambio de las velocidades,  $du$ , en respecto a la distancia transversal,  $y$ , es lineal [25].

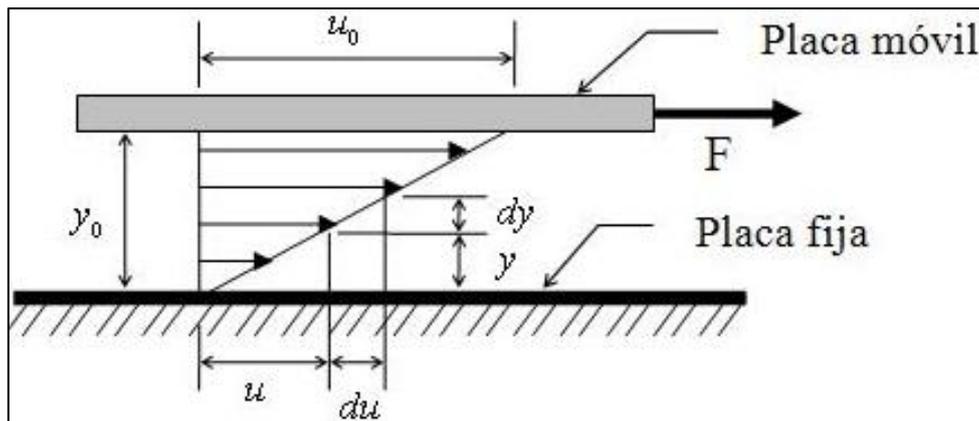


Fig 0.2 Representación de las capas de velocidad en un fluido viscoso.  
Fuente: Viscosidad, Fundamentos teóricos, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela [26].

Donde:

$u = \text{velocidad (m/s)}$

$y = \text{distancia transversal (m)}$

$F = \text{fuerza aplicada (N)}$

Entre esfuerzo y velocidad se relaciona que, a mayor velocidad, mayor esfuerzo cortante

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (6)$$

En esta ecuación a la constante  $\mu$  se le denomina *viscosidad dinámica* del fluido o también *viscosidad absoluta* y tiene como unidades (kg/m.s)

### 1.2.2. Viscosidad cinemática

Al relacionar la viscosidad dinámica con la densidad del fluido se obtiene una razón que tiene como nombre viscosidad cinemática.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Donde:

$v = \text{viscosidad cinemática (m}^2/\text{s)}$

$\mu = \text{viscosidad dinámica (kg/m.s)}$

$\rho = \text{densidad del fluido (kg/m}^3\text{)}$

### 1.2.3. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una forma de cuantificar la energía del fluido por categorías, energía cinética, energía potencial gravitatoria, energía de presión y pérdida de energía por fricción o tubería [24]. En la Fig 0.3 se representa el comportamiento del fluido frente al cambio de sección de una tubería. Al haber menor diámetro aumenta la velocidad del fluido lo cual se respalda con la ecuación de Bernoulli, por conservación de energía.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh_2 + E_{Perdidas} \quad (8)$$

En donde:

$P =$  *Energía de Presión*

$\frac{1}{2}\rho V^2 =$  *Energía Cinética por unidad de volumen*

$\rho gh =$  *Energía Potencial Gravitatoria por unidad de volumen*

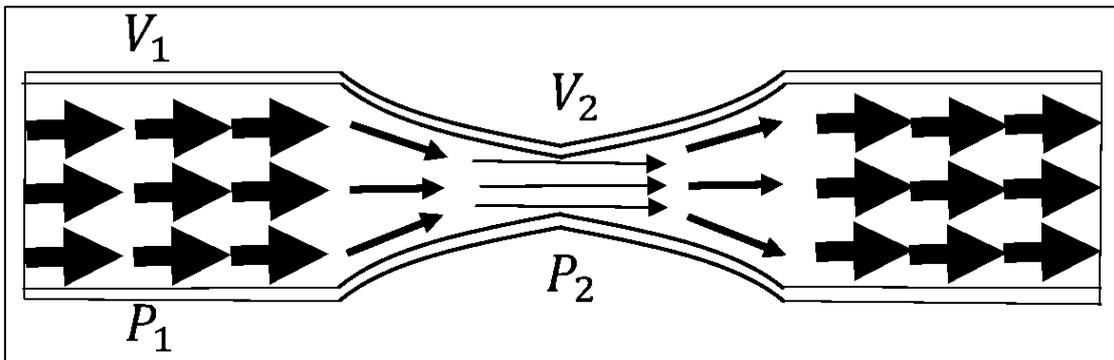


Fig 0.3 Representación de la aplicación de la ecuación de Bernoulli en una tubería con reducción de diámetro.  
Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.4. Número de Reynolds

El comportamiento de los fluidos en fluyen en una tubería redonda depende de cuatro variables: la densidad del fluido, la viscosidad del fluido, el diámetro de la tubería

y la velocidad promedio con la que circula el fluido. Estas cuatro variables establecen una relación conocida como el Número de Reynolds, en nombre al científico Osborne Reynolds quien fue el primero en conocer el comportamiento del fluido utilizando una ecuación. Este número (adimensional), da a conocer si el flujo tiene un comportamiento laminar o turbulento. Como bien se puede intuir, un fluido que circula en régimen laminar, es decir todas las capas del fluido tienen un orden determinado y ninguna capa altera a la otra, tiene un comportamiento más ordenado. Mientras que un fluido en régimen turbulento tiene un comportamiento desordenado y no existen capas de velocidades ya que no hay un orden, en consecuencia, existe más pérdida de energía, pues existe una constante fricción con las paredes de las tuberías.

$$Re = \frac{v_{vel} D \rho}{\mu} = \frac{v_{vel} D}{\nu} = 4 \frac{\dot{m}}{\mu \cdot \pi \cdot D} \quad (9)$$

Donde:

$v_{vel}$  = Velocidad promedio del fluido ( $m/s$ )

$D$  = Diámetro interno ( $m$ )

$\rho$  = densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$\mu$  = viscosidad absoluta o dinámica ( $kg/m \cdot s$ )

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

Con el número de Reynolds se establece que:

Si,  $Re < 2000$ , el flujo está en régimen laminar

Si,  $Re > 4000$ , el flujo está en régimen turbulento

### 1.2.5. Ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy se utiliza para hallar las pérdidas de energía de un flujo a través de secciones rectilíneas y larga de tubos redondos (caída de presión). Es aplicable para régimen laminar y régimen turbulento [24].

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Donde:

$h_L$  = Pérdida de Energía debido a la fricción (m)

$L$  = Longitud de la corriente del flujo (m)

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

$v$  = velocidad promedio del flujo (m/s)

$f$  = factor de fricción (adimensional)

Visto de otra forma, se adecúa la ecuación en función al flujo másico

$$P_L = 8 \cdot f \cdot \frac{L \cdot \dot{m}^2}{D^5 \cdot \rho \cdot \pi^2} \quad (11)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo másico ( $kg/s$ )

Para flujos turbulentos completamente desarrollados, el factor de Darcy se halla con el diagrama de Moody o con:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

Donde:

$\varepsilon =$  Rugosidad absoluta del material (mm)

$D =$  Diametro interno de la tuberia (mm)

### 1.2.6. Ecuación De Hage-Poiseuille

La ecuación de Hage-Poiseuille es una adaptación de la ecuación de Darcy, para flujos en régimen laminar [24].

$$h_L = \frac{32\mu L v_{vel}}{\gamma D^2} \quad (13)$$

Donde:

$\gamma =$  Peso específico ( $N/m^3$ )

### 1.2.7. Rugosidad absoluta ( $\varepsilon$ )

Es una magnitud característica de cada tipo de material y se obtiene de manera experimental. En la Tabla 0.1 se muestra el valor de la rugosidad para algunos materiales

Tabla 0.1 Rugosidad de algunos materiales.  
Fuente: [27].

<b>Material</b>	<b>Rugosidad <math>\epsilon</math> mm</b>
Vidrio, plástico	0
Concreto	0.9 – 9
Duela de madera	0.5
Caucho alisado	0.01
Tubo de cobre o latón	0.0015
Hierro fundido	0.26
Hierro Galvanizado	0.15
Acero inoxidable	0.002
Acero comercial	0.045
Aluminio	0.015-0.06

### 1.3. Aire Comprimido

El aire comprimido es aquella masa de aire que tiene una presión mayor a la atmosférica. Se emplea como energía para mover equipos o se almacena en tanques de oxígeno para su uso posterior en diferentes aplicaciones. Al ser comprimido tiene un aumento de energía que al expandirse se utiliza como fuente para desarrollar un trabajo mecánico [28].

El aire comprimido es utilizado en todas las industrias, desde pequeñas empresas textiles, hasta las grandes mineras [6]. A mayor uso se tenga, mayor será la complejidad del sistema de distribución.

Se utilizan equipos, llamados compresores, cuya función es reducir el volumen del aire, lo cual tiene como consecuencia que se eleve la presión. Por la ley general de los gases ideales.

#### 1.4. Dimensionamiento De La Red De Suministro De Aire Comprimido

La red de suministro tiene como principal función direccionar el aire comprimido, hacia los equipos neumáticos con el caudal y la presión necesaria para que estos operen con su rendimiento nominal y no perjudiquen la producción de la mina [29].

El dimensionamiento de la red de suministro es un paso de gran importancia. En este paso es en donde se puede realizar el mayor ahorro de operación si y solo si se hace un buen dimensionamiento. Esto se refleja en bajas caídas de presión durante su operación las cuales deben ser menor al 10% de la presión que demanda el sistema [6], [30]. Para ello se deben escoger bien los diámetros de las tuberías. Además, los diámetros de las tuberías se irán reduciendo conforme estas se alejen de la sala de compresores o, visto de otra forma, a medida que vaya disminuyendo el caudal que fluye por las tuberías.

Una red de distribución de aire comprimido está conformada por: Línea principal, línea de distribución, línea de servicio y accesorios: como se observa en la Fig 0.4.

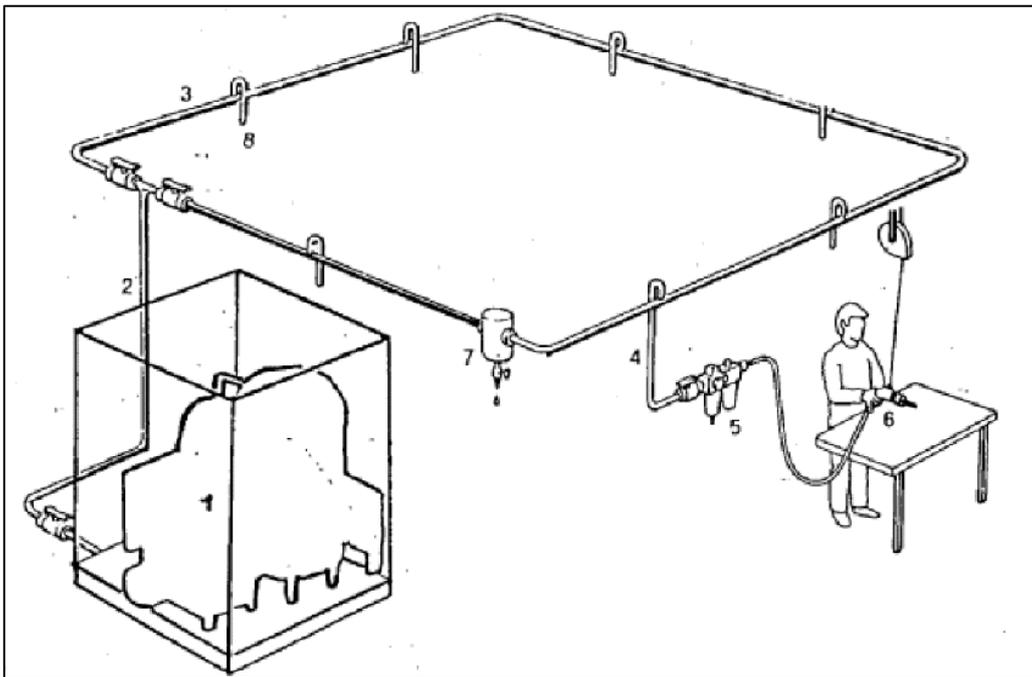


Fig 0.4 Partes de una red de distribución de aire comprimido  
Fuente: Construcción de una red de aire comprimido [31].

Donde:

- (1) Unidad de compresión
- (2) Línea Principal
- (3) Línea de distribución
- (4) Línea de servicio
- (5) Accesorios
- (6) Herramienta
- (7) Separador de condensado
- (8) Válvula de paso

#### 1.4.1. Parámetros de diseño de la red de suministro de aire comprimido

Para realizar el dimensionamiento de una red de suministro se deben tomar en cuenta los parámetros con los que se quiere que opere la mina. Entre ellos, los parámetros más importantes son los que se muestran en la **Tabla 0.2**:

**Tabla 0.2** Parámetros de Diseño de la red de distribución de aire comprimido.  
Fuente: [32].

N°	Parámetros de diseño	Unidades
1	Presión de trabajo	kPa - Psi
2	Caudal	m <sup>3</sup> /s - cfm
3	Flujo másico	Kg/s – lb/s
4	Caída de presión	kPa - Psi
5	Velocidad de circulación	m/s - ft/min

##### 1. Presión de trabajo

La presión de trabajo es tanto la presión con la que se debe llegar el aire comprimido a los puntos de operación; como la presión que sale del compresor [32].

## 2. Caudal

Es caudal aire comprimido que demanda el sistema y que el compresor debe entregar para que los equipos trabajen dentro del rango óptimo. La magnitud del caudal depende de las operaciones de cada mina.

Regularmente, el caudal de aire comprimido se expresa en aire libre suministrado (FAD por sus siglas en ingles) y sus unidades son Nm<sup>3</sup>/min o Nl/min [32].

## 3. Flujo másico

A pesar de no ser un parámetro común para el diseño de las redes de distribución de aire comprimido, se debe tomar en cuenta para el buen funcionamiento de los equipos neumáticos. Esto debido a que los equipos neumáticos se mueven gracias a la energía que transmite el aire comprimido, la cual se encuentra a una presión determinada. Es decir, los equipos neumáticos deben trabajar con el mismo flujo másico y misma presión en todas las condiciones.

## 4. Caída de Presión

La caída de presión, en una tubería recta, es la pérdida de energía en forma de calor que se origina por la viscosidad de los fluidos, generando un esfuerzo cortante sobre la pared de las tuberías. A esto tipo de pérdida de energía también se le conoce como pérdidas de línea en el área de mecánica de fluidos.

Por otro lado, existen accesorios que cambian el sentido del flujo, en los cuales se genera pérdidas de energía forma.

Finalmente, conseguir bajas caídas de presión a bajos precios, debe ser la ambición del diseñador de la red [32].

## 5. Velocidad de circulación

Es de suma importancia tener una velocidad lineal controlada, ya que, a mayor velocidad, mayor son las caídas de presión. Además, para que los filtros sean efectivos la velocidad con la que circula el fluido no debe ser alta [32]. Normalmente las velocidades varían entre 3 a 8 m/s en tuberías y hasta 15 m/s en las líneas de servicio.

### 1.5. Caída De Presión

La caída de presión se calcula utilizando la ecuación de Darcy. Esta ecuación depende del diámetro de la tubería y en mayor magnitud de la velocidad con la que circula el fluido. La caída de presión es una pérdida de energía, ya sea por transferencia de calor, al rozar el fluido con las tuberías o ya se por fugas en las tuberías. En ambas formas se pierde energía, lo cual tiene una repercusión negativa en los costos de operación.

Hasta hace 10 años se recomendaba una caída de presión máxima por etapa de la red. Actualmente se recomienda que en total la caída de presión del sistema no exceda el 10% de la producción efectiva de la sala de compresores [6], [30].

La segunda forma de calcular la caída de presión es [5]:

$$\Delta p = \frac{450 q_c^{1.85} l}{d^5 p} \quad (14)$$

Donde:

$q_c$  = aire libre suministrado, FAD (l/s)

$p$  = presión absoluta de entrada (bar(a))

$d$  = diametro interno de tubería (mm)

$l$  = longitud de tubería total (m)

La ecuación (14) es una expresión empírica propuesta por Atlas Copco en general para tuberías de aceros comerciales [33].

#### 1.6. Factor por altura

A medida que aumenta la altitud respecto al mar, disminuye la presión atmosférica. Esto se debe a que, a mayor altitud, menor columna de aire que ejerza presión sobre los cuerpos en la superficie terrestre [34]. Esto afecta de forma negativa a la relación de presión de los compresores. Lo cual se corrige con el factor por altura el cual depende:

$$F = \frac{P_{std}}{P_{amb}} \quad (15)$$

Donde:

$F$  = Factor por altura

$P_{std}$  = Presión estandar

$P_{amb}$  = Presión ambiental en el escenario de diseño

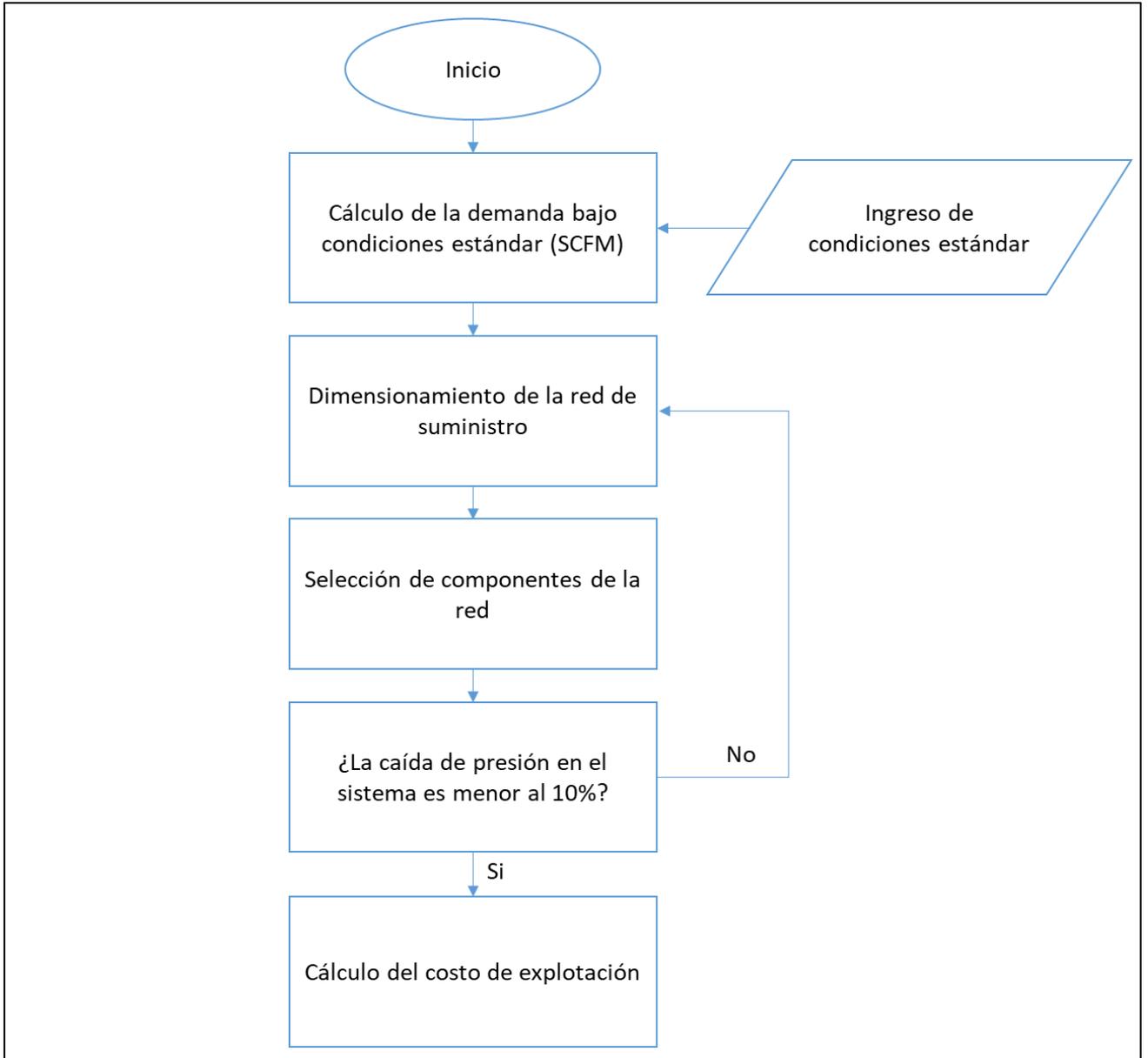
## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

El dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en altura se ha realizado por varios años con la metodología hecha para condiciones estándar. Al cálculo de la demanda de aire comprimido se le multiplica por un factor que varía de acuerdo a la altura y con ello se calcula la caída de presión para seleccionar el diámetro con el que se trabajará en altura. Sin embargo, esta metodología no es la adecuada para redes ubicadas en altura, dado que existe la probabilidad de que haya un sobredimensionamiento de las tuberías de la red de aire comprimido. A continuación, se muestran la metodología tradicional y la metodología propuesta.

#### **2.1. Metodología Tradicional de Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido**

Para el desarrollo de la metodología tradicional de diseño de las redes de suministro de aire comprimido en condiciones estándar, se siguen los pasos mostrados en la **Fig 2.1**.



**Fig 2.1** Esquema de la Metodología Tradicional de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en condiciones estándar. **Fuente:** Elaboración propia.

### 2.1.1. Cálculo de la demanda a condiciones estándar

Para dimensionar la red de suministro se deben tener como datos el caudal y la presión necesaria en cada frente de trabajo. El cálculo del dimensionamiento se realiza considerando las condiciones estándar mostradas en la **Tabla 2.1**

Tabla 2.1. Condiciones Estándar. Fuente: [35].

<b>Condiciones Iniciales</b>	<b>Magnitud</b>
Temperatura Ambiental	68 °F
Presión Ambiental	14,5 psia
Humedad Relativa	0 %

El caudal nominal total de los equipos se obtiene de catálogos y se utiliza el grado de utilización según la frecuencia con la que se planea que operara cada equipo. Sin embargo, para un diseño más conservador y duradero en el tiempo, se debe tomar en cuenta factores como el desgaste de las herramientas, lo cual aumenta en 6% el caudal necesario; las fugas de aire comprimido, 19% y la reserva para una pronta expansión de la mina, 30% [36].

A continuación, se realiza la presentación de la demanda del sistema de suministro de aire comprimido. Para esto se realiza una sumatoria de las demandas de los equipos. Ahora se procede a mostrar la forma en la que se realiza este conteo de equipos.

Tabla 2.2. Representación de la demanda del caudal y presión.

**Fuente:** Elaboración propia.

<b>Equipos</b>	<b>Demanda cfm</b>	<b>Presión psig</b>
E_1	Q_1	P_1
E_2	Q_2	P_2
E_3	Q_3	P_3
⋮	⋮	⋮
E_n	Q_n	P_n
Total	$\sum_1^n Q$	$P_{max}$

En la Tabla 2.2 se representan los valores que se toman en cuenta para realizar el cálculo de la demanda del sistema.

### 2.1.2. Geometría y dimensionamiento de la red de suministro

La red de suministro debe ser capaz de suministrar aire comprimido con la presión y el caudal necesario en cada frente de trabajo. Por lo tanto, la red debe seguir una trayectoria para llegar a cada frente. Muchas veces, debido al espacio del que se dispone, solo es posible que la red siga una única trayectoria. En otras situaciones, en las que se dispone de mayor espacio, es posible contemplar diversas trayectorias. Cuando se presente este segundo escenario se debe optar por la trayectoria que tenga menor cantidad de cambios de dirección. La razón es que los cambios de dirección producen mayor caída de presión que de la que produce una tubería en línea recta y por lo tanto utiliza mayor energía eléctrica.

Por otro lado, se debe saber que conforme el flujo disminuya, ya sea porque una fracción se utilizó en un frente o porque existen fugas; se debe disminuir el diámetro de la tubería con la finalidad de mantener una baja caída de presión. Esto se traduce en menores costos de operación.

En otro punto, como se puede apreciar en el **Anexo 2. Marco Teórico** las redes de suministro pueden estar hechas de diferentes materiales. Hasta hace pocos años, el único material que se utilizaba para estas redes eran los aceros ya que presentaban una gran dureza y con ello una larga vida útil. Con los avances tecnológicos se implementó el uso de aluminio como material para las tuberías de red de suministro. Entre algunas de sus ventajas se encuentra que tiene una muy baja rugosidad, presenta mayor maleabilidad, es más ligero que el acero y por ello es más fácil su manejo. Como resultado de estas ventajas se reduce el número de horas hombre necesario para instalar una red de suministro.

Por lo anteriormente mencionado, para la realización de este paso, es necesario conocer el lugar donde será ubicado la red y los espacios de los que se dispone. Se debe hacer bosquejos en 3D de cuál será la trayectoria de la red y verificar que tengan la menor cantidad de accesorios posibles.

### **2.1.3. Selección de Componentes de la Red**

Toda red de suministro de aire comprimido debe contar con filtros y puntos de purga cada cierta cantidad de metros. Esto es completamente necesario para poder proteger a los equipos neumáticos de las precipitaciones de la humedad. Al mismo tiempo, este tipo de accesorios así como todos los demás, generan caídas de presión. Por ello, deben ser cuidadosamente seleccionados, de manera que se asegure una caída de presión no mayor al 10% de la presión suministrada a la red por la compresora, de acuerdo a recomendaciones de estándar.

Para la selección adecuada de los componentes se debe conocer la presión y el caudal que llega a estos mismos. De tal forma que conociendo el factor de Darcy para cada accesorio, se pueda escoger el adecuado y así asegurar una baja caída de presión.

Para la selección de componentes se puede consultar a libros de fluidos o a catálogos donde se encuentra la especificación de trabajo de cada accesorio y la caída de presión que debería presentar. Para el caso de esta tesis, no se consideran las caídas de presión por forma, únicamente las de longitud.

### **2.1.4. Cálculo de las Caídas de Presión**

Una vez que se tiene la trayectoria de la red, junto con sus diámetros y sus accesorios, es posible calcular la caída de presión en toda la red. Esto se hace con la finalidad de conocer cuál es la presión y el caudal que llega a cada frente de trabajo. Si en caso la presión que llega a uno de los frentes, no es la adecuada, se debe hacer un cálculo iterativo asumiendo una nueva presión de entrada, que debe ser la anterior presión considerada más la diferencia de presión que hace falta en un frente.

Una vez que se hizo el cambio de presión de entrada se vuelve a realizar el cálculo y verificar que cada frente tenga la presión y el caudal necesario. De satisfacer las necesidades de los equipos se procede a la búsqueda una compresora adecuada. De no satisfacer las necesidades de los equipos se debe volver a realizar un análisis iterativo.

Para el cálculo de caída de presión se con la metodología tradicional se utiliza la ecuación (14) que se muestra en la sección 1.5 del marco teórico:

$$\Delta p = \frac{450 q_c^{1.85} l}{d^5 p}$$

### 2.1.5. Cálculo del costo de explotación

Luego de diseñada la red, se procede a establecer 3 posibles casos con diferentes compresores, es decir, tres casos con diferentes costos de inversión. De los cuales se calculó el costo de producción de cada mil pies cúbicos al año. Siendo las fórmulas utilizadas para hallar el costo de inversión anual, las que se muestran a continuación:

$$C_{expl} = C_{op} + C_{tub} \quad (16)$$

Para el cálculo del costo de instalación de las tuberías, se extrapoló una ecuación que depende del diámetro y se muestra a continuación (D en mm y L en m):

$$C_{tub} = (0,0145 \cdot D^2 + 0,3455 \cdot D + 38) \cdot L \quad (17)$$

$D =$  Diámetro interno de tubería (mm)

$L =$  Longitud de tubería (m)

Mientras que para el cálculo del costo por caída de presión por un año es:

$$C_{op} = 0,07 \frac{USD}{kWh} \cdot \Delta P \cdot Q \cdot \frac{8640}{0,94} \cdot \frac{h}{a} \quad (18)$$

$\Delta P =$  Caída de presión (kPa)

$Q =$  Caudal ( $m^3/s$ )

## 2.2. Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido en Altura con Metodología Tradicional.

La metodología tradicional de dimensionamiento de redes de aire comprimido en altura es una extensión de la metodología de dimensionamiento de redes de aire

comprimido en condiciones estándar. El esquema de esta metodología se muestra en la Fig. 2.2.

En esta metodología se utiliza un caudal en altura equivalente al caudal en condiciones estándar. Para ello se utilizan dos términos “*Pies cúbicos por minuto estándar (SCFM por sus siglas en ingles)*” y “*Pies cúbicos por minuto real (ACFM)*”. El SCFM se refiere al caudal en condiciones estándar necesario para que los equipos trabajen en condiciones nominales y ACFM se refiere al caudal en altura necesario para que los equipos trabajen en sus condiciones nominales. La fórmula que los relaciona es la siguiente:

$$ACFM = SCFM \cdot \frac{P_{std}}{P_a - (P_{sat} \cdot \omega)} \cdot \frac{T_a}{T_{std}} \quad (19)$$

Donde:

$P_{std}$  = Presión estandar

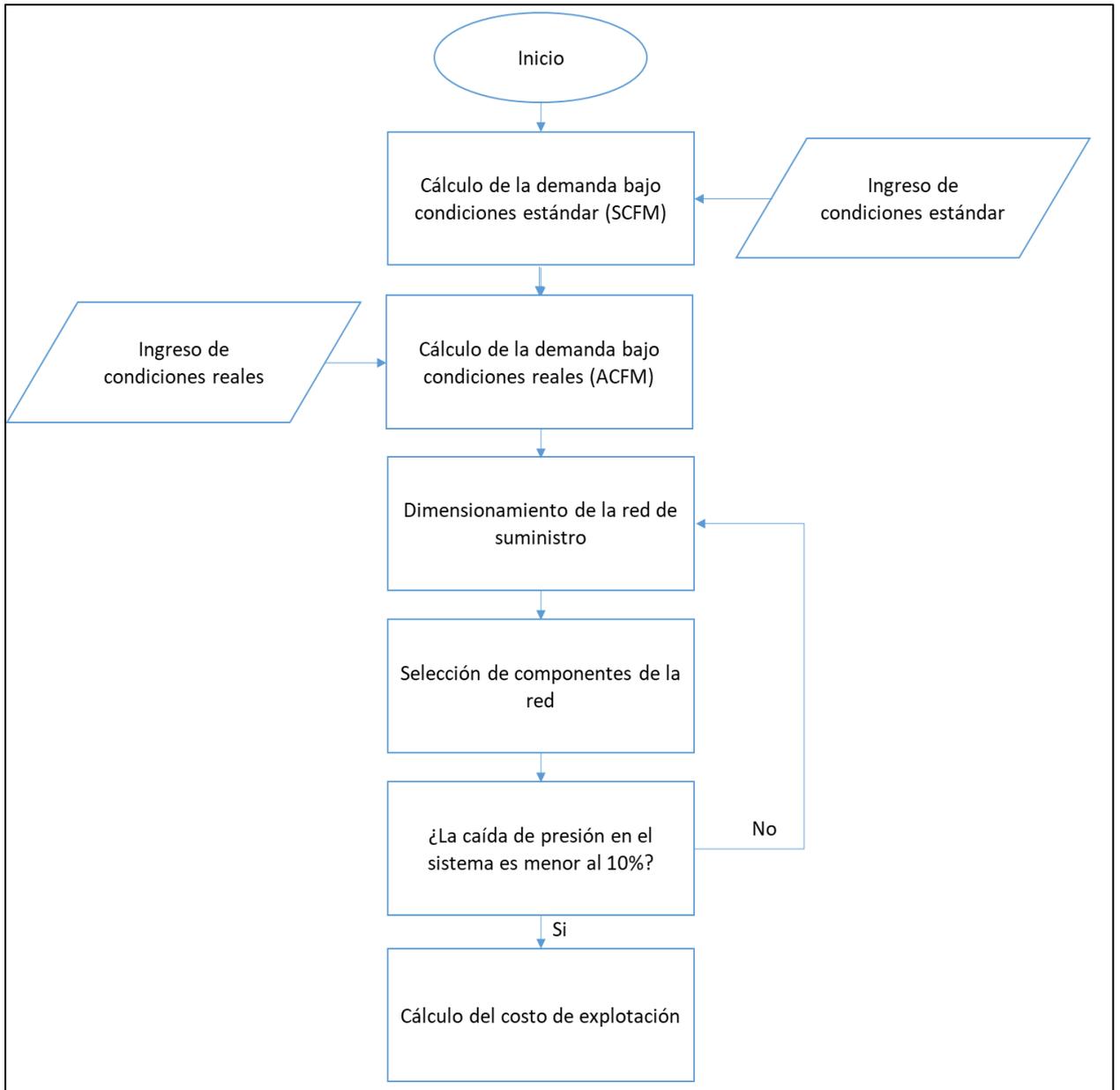
$P_a$  = Presión real

$P_{sat}$  = Presión de saturación a la temperatura real

$T_a$  = Temperatura real

$T_{std}$  = Temperatura estandar

$\omega$  = Humedad relativa



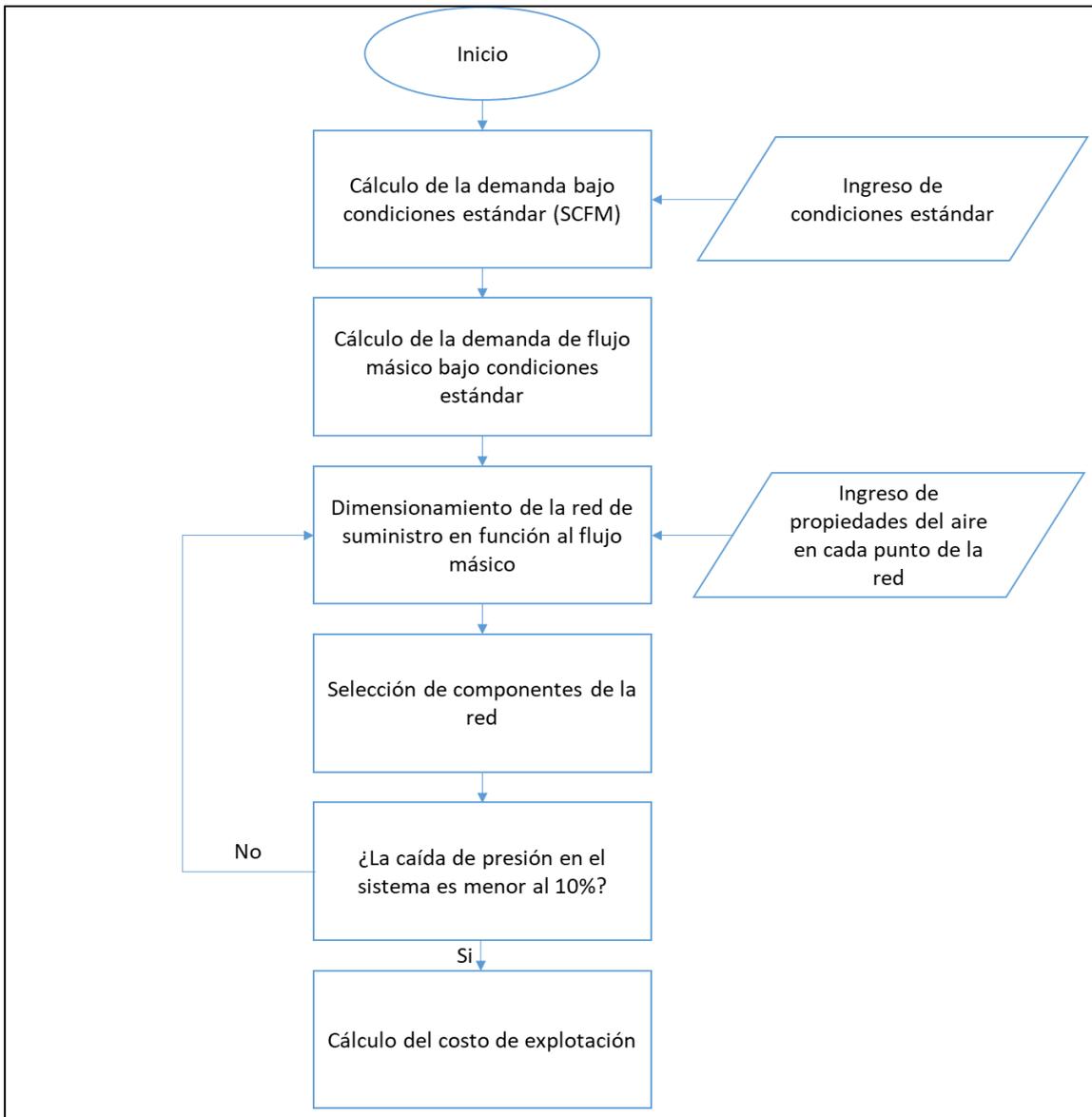
**Fig. 2.2. Esquema de la Metodología tradicional de dimensionamiento de redes de aire comprimido en altura.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Luego de calcular la demanda de la red en condiciones estándar se utiliza la relación mostrada para hallar el caudal necesario en gran altura.

Luego de hallar el caudal real (ACFM) necesario en gran altura se procede con los pasos ya mencionados en la sección 2.1.

### 2.3. Metodología Mejorada para el Dimensionamiento de Redes de Suministro de Aire Comprimido en Altura

Conocida la Metodología tradicional de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en gran altitud, se muestran los pasos de la metodología mejorada en la **Fig 2.3**.



**Fig 2.3.** Esquema de la Metodología mejorada para el dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en altura. **Fuente:** Elaboración propia.

### 2.3.1. Cálculo de la demanda en función al flujo másico en condiciones estándar

La propuesta de la metodología mejorada es realizar los cálculos de caídas de presión y dimensionamiento de la red en base al flujo másico. El cálculo del flujo másico se realiza conociendo el caudal volumétrico en condiciones estándar. Luego se calcula el flujo másico utilizando la ley de los gases ideales. Con esto se procede a calcular la caída de presión y el caudal que debe circular por la red de suministro.

Para el cálculo del flujo másico se utiliza la ley de los gases ideales como se muestra a continuación [36]:

$$P \cdot \dot{v} = R_{aire} \cdot T \cdot \dot{m}$$

Donde:

$P =$  Presión absoluta (kPa)

$v =$  Flujo volumétrico (L/s)

$R =$  Constante del aire,  $287 \left( \frac{\text{kPa} \cdot \text{L}}{\text{°K} \cdot \text{kg}} \right)$

$T =$  Temperatura (°K)

$\dot{m} =$  Flujo másico (kg/s)

### 2.3.2. Cálculo de la caída de presión con metodología mejorada

A diferencia de la fórmula empleada en la metodología tradicional, en la metodología mejorada se considera el valor de rugosidad relativa de la tubería de aluminio, el factor de Darcy y la fórmula de Darcy. Aunque esto implica una mayor complejidad en el desarrollo, ofrece valores más precisos. Para ello se utiliza la ecuación (11):

$$P_L = 8 \cdot f \cdot \frac{L \cdot \dot{m}^2}{D^5 \cdot \rho \cdot \pi^2}$$

Terminado este proceso ya se cuentan con las variables necesarias para calcular la caída de presión para cada diámetro. Lo cual se realiza de la manera siguiente en la Tabla 2.3

**Tabla 2.3. Cálculo de la caída de presión para diferentes diámetros. Fuente: Elaboración propia**

D_nom		D_int		ΔP		
in	mm	in	mm	kPa	psi	bar
1/8	3.18	0,27	6,8	5 707 017 795	827 734 447	57 070 178
1/4	6.35	0,36	9,2	1 257 950 953	182 450 690	12 579 510
3/8	9.53	0,49	12,5	276 017 127	40 032 972	2 760 171
1/2	12.70	0,62	15,8	86 341 324	12 522 773	863 413
3/4	19.05	0,82	20,9	21 160 921	3 069 138	211 609
1	25.40	1,05	26,6	6 328 389	917 857	63 284
1 1/2	38.10	1,61	40,9	743 090	107 776	7 431
2	50.80	2,07	52,5	213 043	30 899	2 130
2 1/2	63.50	2,47	62,7	87 612	12 707	876
3	76.20	3,07	77,9	29 573	4 289	296
5	127.00	5,05	128,2	2 455	356	25
6	152.40	6,03	153,1	1 010	146	10
8	203.20	8,01	203,5	244	35	2
10	254.00	10,02	254,5	80	12	1
12	304.80	11,25	285,8	45	6	0
16	406.40	15,25	387,4	10	1	0
20	508.00	19,25	489,0	3	0	0
30	762.00	29,25	743,0	0	0	0
40	1016.00	39,25	997,0	0	0	0
48	1219.20	47,25	1200,2	0	0	0

El aluminio se ha vuelto el mejor material para tuberías de aire comprimido y no solo por su bajo valor de rugosidad, sino también por la ligereza y por la maleabilidad que presenta. El valor de su rugosidad absoluta varía entre 0,015 y 0,006 mm. Para el desarrollo de esta tesis se tomó el valor de 0,015 mm.

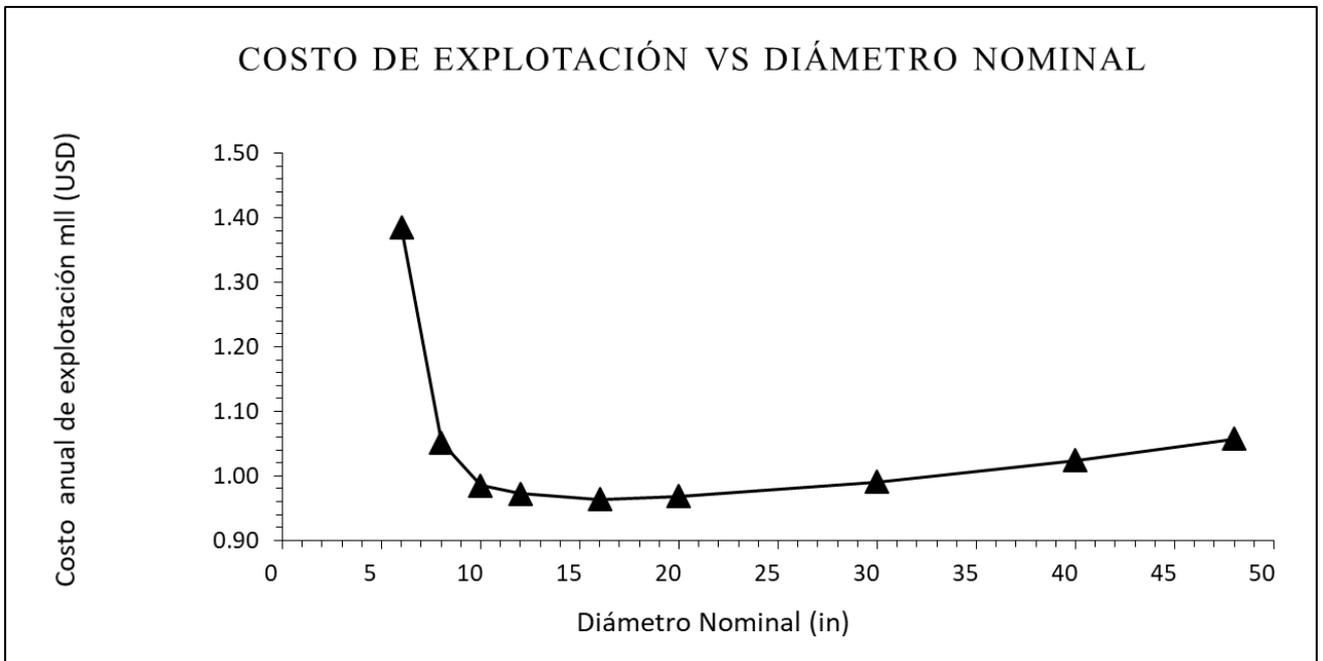
A continuación se presenta en la Tabla 2.4 el consolidado de fórmulas que se emplean en la metodología mejorada:

**Tabla 2.4.** Consolidado de fórmulas a utilizar en metodología mejorada. **Fuente:** Elaboración propia

Descripción	Simbología	Fórmula
Flujo másico	$\dot{m}$	$P. \dot{v} = R. T. \dot{m}$
Número de Reynolds	Re	$Re = 4 \frac{\dot{m}}{\mu. \pi. D}$
Factor de Darcy	f	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$
Caída de presión	$\Delta P$	$P_L = 8. f. \frac{L. \dot{m}^2}{D^5. \rho. \pi^2}$

### 2.3.3. Selección del diámetro óptimo

Al finalizar, la decisión de qué diámetro de tubería se debe utilizar dependerá de muchas variantes, como de proveedor, tiempos de entrega, tiempo de ejecución del proyecto, etc. Dentro de la metodología mejorada se considera que la decisión se basará en el costo de explotación. De forma similar a la Tabla 2.3, se calculan los costos de instalación, ecuación (17), y de operación, ecuación (18) de la sección 2.1.5, para luego con la suma de ambas obtener el costo de explotación para cada diámetro. De esta forma, el diámetro óptimo es el que presenta menor costo de explotación, véase Fig 2.4.



**Fig 2.4.** Modelo de curva del costo de explotación vs diámetro nominal. **Fuente:** Elaboración propia.

# CAPÍTULO III

## APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA MEJORADA

### 3.1. CASO 1: Dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido para operaciones en minería subterránea

En las operaciones de minería subterránea suele existir un único recorrido para llegar a los frentes de trabajo, por lo que el diseño no implica ver la trayectoria de la red de suministro. En este sentido, el trabajo de diseño va únicamente por el dimensionamiento de las tuberías en base a un cálculo preciso del caudal de trabajo y a la caída de presión que tendrá la red.

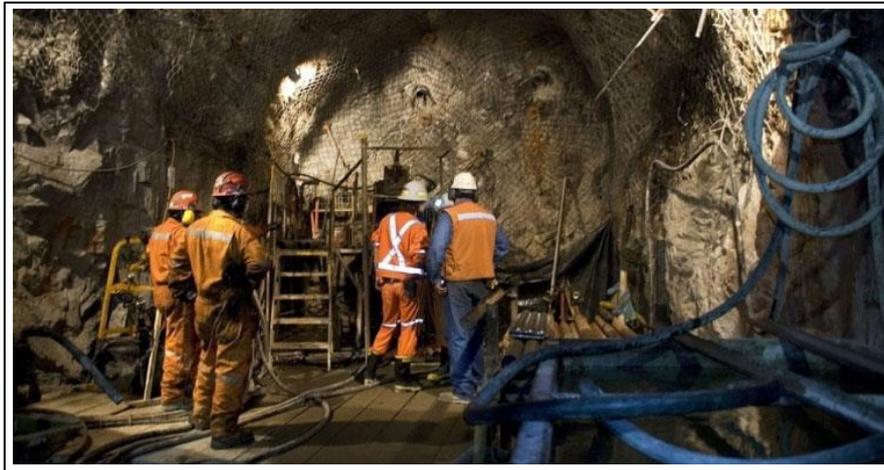


Fig 3.1. Galería de una mina subterránea. Fuente: [38]

En la aplicación de la metodología se considera el modelo de operaciones de minería subterránea que se muestra en la Fig 3.2 y con las consideraciones que se muestran en la Tabla 3.1

Parámetro	Magnitud	Unidad
Costo de electricidad	0,07	USD/kW-h
Horas operadas	5 760	h/año

Tabla 3.1 Consideraciones de operación e instalación en el modelo de mina.  
Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.2 se calcula la demanda de los equipos neumáticos en condiciones estándar, es decir el caudal y la presión, para que trabajen en su rango nominal.

Luego, se consideran los porcentajes adicionales por desgaste de herramientas, fugas de aire y reserva para una pronta expansión, se obtiene una nueva demanda que se debe satisfacer, siendo esta la que se muestra en la **Tabla 3.3**

Tabla 3.2 Cálculo de la demanda de aire. Fuente: Elaboración propia.

Herramientas	Consumo de aire (SCFM)	Cantidad de máquinas	Grado de utilización	Necesidad de aire (SCFM)
Winche Neumático	424	1	0,4	170
Jack Leg	206	5	0,6	617
Stoper	265	1	0,6	159
Jack Hammer	78	1	0,6	47
Wagon Drill	449	1	0,7	314
Pala Neumática	250	2	0,3	150
Necesidad Total				1457

**Tabla 3.3** Demando de aire comprimido considerando desgaste y fugas en el sistema Fuente: Elaboración propia.

Herramientas	SCFM	Presión Nominal
Winche Neumático	248	95
Jack Leg	900	90
Stoper	232	90
Jack Hammer	69	90
Wagon Drill	459	90
Pala Neumática	219	95
Demanda Total	2127	

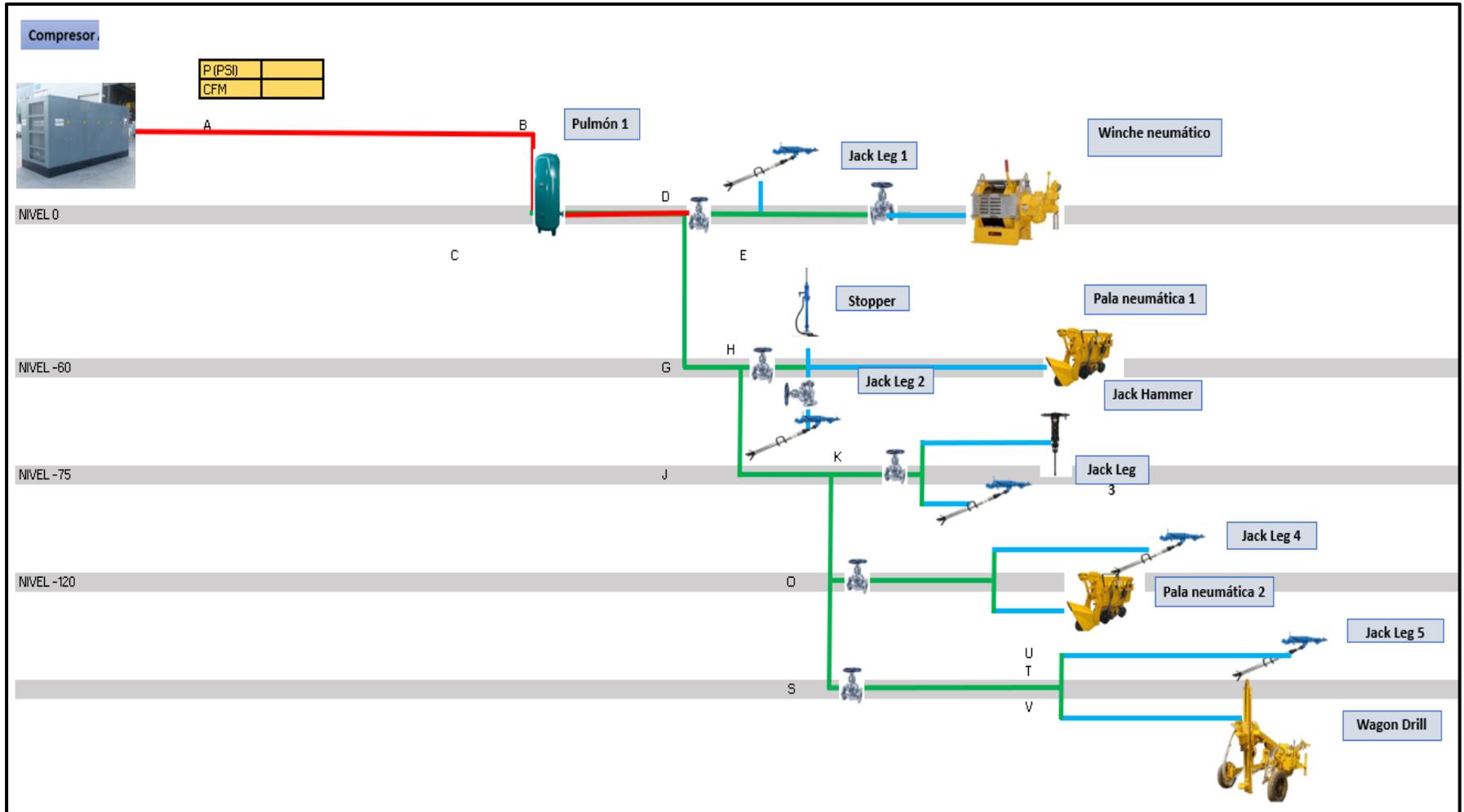


Fig 3.2. Modelo de mina a evaluar en la presente tesis  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1. Dimensionamiento de red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología tradicional en condiciones estándar

#### Dimensionamiento de la línea principal, tramo A-D

Se evalúa el rendimiento del modelo de operaciones de mina subterránea a nivel del mar bajo las condiciones iniciales que se muestran en la **Tabla 2.1**.

En la Fig 3.3 se muestra la gráfica que representa a la caída de presión para cada diámetro nominal de tubería en el tramo A-D del modelo de mina a nivel del mar utilizando la ecuación (14).

$$\Delta p = \frac{450 q_c^{1.85} l}{d^5 p}$$

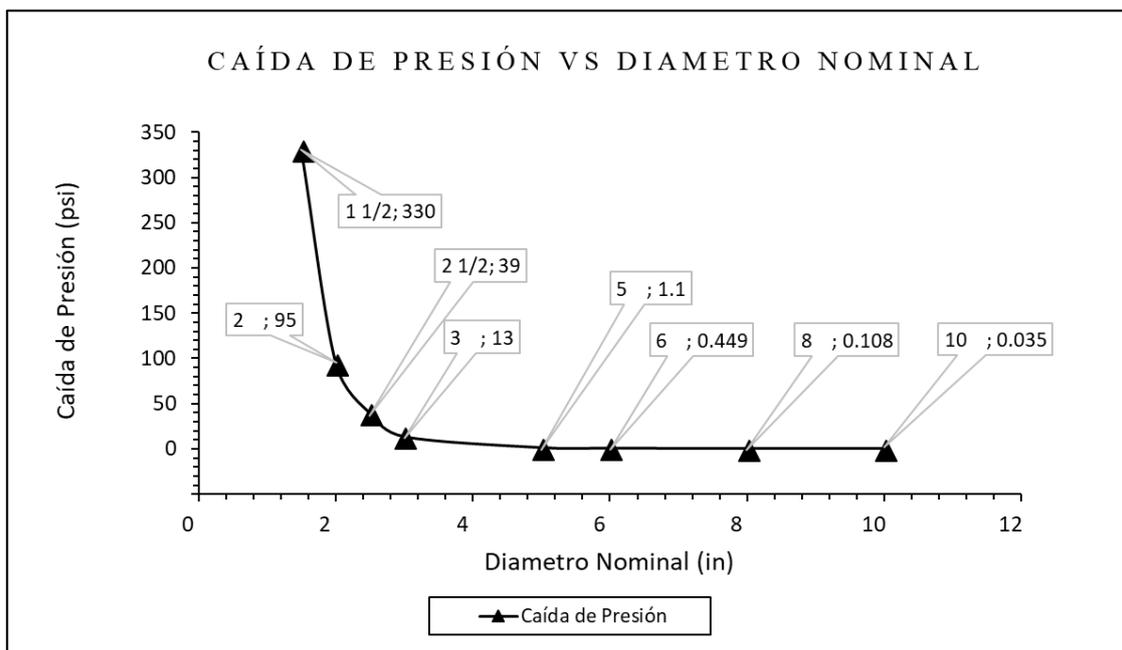


Fig 3.3 Caída de presión vs diámetro interno en el tramo A-D de la mina modelo a nivel del mar.  
Fuente: Elaboración Propia. Utilizando Microsoft Excel 2016.

En la Fig 3.3 se aprecia que, a menor diámetro, mayor caída de presión y que además no es una relación lineal. Al observar la fórmula de la que se obtienen estos resultados, se aprecia que la caída de presión tiene una dependencia exponencial con respecto al diámetro de la tubería.

## Validación de los resultados

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos, se utilizó el programa de simulación Flownex muy útil para analizar sistemas complejos. En este caso se utilizó para la validación de la caída de presión en el tramo A-D de la red de suministro en condiciones estándar simulando una tubería de aluminio de 6 in (153.11 mm).

En el programa se diseñó el diagrama que se muestra en la Fig 3.4

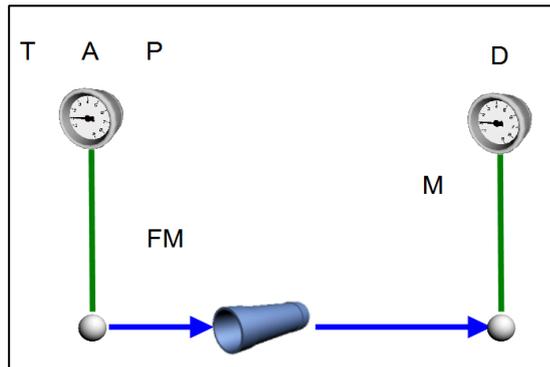


Fig 3.4 Diagrama del primer tramo de la red de distribución de aire comprimido en condiciones estándar en el programa Flownex.

Fuente: Elaboración propia. Utilizando Flownex S.E. 8.9.

En donde las condiciones de frontera son

Para el nodo A

**Tabla 3.4.** Condiciones de Frontera para el nodo A en el primer tramo.

Fuente: Elaboración propia. Utilizando Flownex S.E.

Parámetros	Magnitud	Unidades
Presión	116.5	Psi
Temperatura	80	°C

Para el nodo D

**Tabla 3.5.** Condiciones de Frontera para el nodo D en el primer tramo.

Fuente: Elaboración propia. Utilizando Flownex S.E.

Parámetros	Magnitud	Unidades
Flujo másico	-1,1937	kg/s

Con lo que se obtiene:

$$\Delta P = 0,54 \text{ psi}$$

**Tabla 3.6.** Comparación de Resultados de método tradicional y software. **Fuente:** Elaboración propia.

<b>Parámetros</b>	<b>Met. Tradicional</b>	<b>Software</b>
Caída de Presión (psi)	0,449	0,542
Diámetro ( in)	6	6
Longitud (m )	130	130

Por lo tanto, el margen de error de la fórmula utilizada con respecto al resultado de la simulación es:

$$Error\% = \frac{0,54 - 0,45}{0,54} = 17,28\%$$

El margen de error es de 17,28%. Este es un valor relativamente alto por lo que se afirma que la ecuación utilizada no es la adecuada para este caso. Dado que la ecuación (14) fue elaborada de forma práctica para hallar la caída de presión en tuberías de acero comercial en condiciones estándar, el resultado no es exacto para las tuberías de aluminio, pues la rugosidad es un factor que varía.

### **Dimensionamiento de la red de suministro**

Para elegir el diámetro óptimo para cada tramo se considera el diámetro con menor costo de explotación anual, resultado de sumar el costo de operación anual con el costo de instalación de las tuberías por cada diámetro, ecuación (17), como se muestra en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Costo de explotación para cada diámetro de tubería. **Fuente:** Elaboración Propia.

D_nom	ΔP	Costo de Operación 16 h al día por año	Costo por caída de presión	Costo de Instalación	Total Anual
in	psi	USD	USD	USD	USD
1/8	2 535 262	22 323 463 556	22 016 650 979	5 102	22 323 468 657
1/4	558 827	4 921 376 966	4 852 949 137	5 301	4 921 382 267
3/8	122 617	1 080 639 552	1 064 824 565	5 539	1 080 645 091
1/2	38 356	338 741 339	333 089 340	5 814	338 747 153
3/4	9 400	83 794 616	81 635 038	6 480	83 801 095
1	2 811	25 778 629	24 413 791	7 297	25 785 926
1 1/2	330	3 932 280	2 866 707	9 388	3 941 667
2	95	1 859 056	821 884	12 086	1 871 142
2 1/2	39	1 368 445	337 993	15 393	1 383 838
3	13	1 141 429	114 087	19 308	1 160 737
5	1	1 035 359	9 470	41 047	1 076 406
6	0	1 029 708	3 896	55 566	1 085 274
8	0	1 026 711	940	91 899	1 118 610
10	0	1 026 069	307	137 961	1 164 030

En la Tabla 3.7 se muestra resaltado de color verde el menor costo de explotación. Mientras que en color rojo se muestra el mayor costo de explotación. Se puede ver que el menor costo de explotación se presenta cuando el diámetro nominal es de 5 in mientras que el mayor costo de explotación se presenta con el menor diámetro nominal, 1/8 in.

Luego de calcular los diámetros óptimos para cada tramo. En la Tabla 3.8 se presenta el diseño de la red en condiciones estándar:

**Tabla 3.8** Diseño de la red de distribución en condiciones estándar. **Fuente:** Elaboración propia.

<b>Tramo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Presión de entrada</b>	<b>Presión de Salida</b>	<b>Caída de Presión</b>
-	<b>m</b>	<b>in</b>	<b>psia</b>	<b>psia</b>	<b>psi</b>
A - D	130	5	116.5	115.410	1,090
D - E	30	2 1/2	115.410	114.943	0,467
E - F	20	2	114.943	114.666	0,277
D - H	60	5	115.410	115.070	0,340
H - I	30	3	115.070	114.839	0,231
H - K	60	3	115.070	113.014	2,056
K - L	30	2	113.014	112.588	0,426
K - O	30	3	113.014	112.339	0,674
O - P	50	2	112.339	111.396	0,943
O - T	100	3	112.339	111.207	1,133
T - V	10	2 1/2	111,207	111,023	0,184
Total	550				7,821

Para validar el diseño de la red de distribución de aire comprimido en condiciones estándar y sus resultados, se diseñó la red de aire comprimido en el programa de simulación Flownex como se muestra en el

Anexo 6. Se establece como condición de frontera el flujo másico en los nodos y la presión de ingreso únicamente en el nodo A, la cual es 102 psi.

Con los valores de frontera se da solución al esquema. Luego se generó y exportó un archivo Excel con los resultados del sistema y las propiedades del fluido en cada punto. Dado que el diseño se realizó considerando únicamente pérdidas lineales, es decir en las tuberías, se tomó la caída de presión de cada tramo de tubería y se realizó una sumatoria, obteniendo una variación de presión total de 2,34 psi.

$$\Delta P = 9,13 \text{ psi}$$

Resultado que nos da un margen de error con respecto a la fórmula utilizada para el diseño de la red. Siendo el valor del porcentaje de error el siguiente:

$$Error\% = \frac{9,13 - 7,82}{9,13} = 14,35\%$$

El margen de error es de 14,35%. Este valor es alto para su validación y se podría deber a que la fórmula utilizada para el diseño es empírica y dirigida a diseños con tuberías de acero comercial y no de aluminio, que es el material que se considera para este diseño según la metodología tradicional.

### Cálculo del costo de explotación

En la **Tabla 3.9** se muestra el costo de explotación para cada tramo del sistema y con ello el costo de explotación del sistema. Se observa que el costo de explotación para el sistema es de \$4 365 700.

**Tabla 3.9.** Caída de presión, costo de instalación, de operación y anual para el tramo A-D. **Fuente:** Elaboración propia.

Tramo	D_nom	ΔP	Costo de Operación	Costo de Instalación	Costo de Explotación
-	in	psi	USD	USD	USD
A - D	5	1,09	1 035 359	41 047	1 076 406
D - E	2 1/2	0,47	207 240	3 552	210 793
E - F	2	0,28	119 875	1 859	121 734
D - H	5	0,34	821 798	18 945	840 743
H - I	3	0,24	251 989	4 456	256 445
H - K	3	2,06	578 007	8 911	586 918
K - L	2	0,43	120 543	2 789	123 332
K - O	3	0,67	450 442	4 456	454 898
O - P	2	0,94	140 792	4 649	145 441
O - T	3	1,13	311 257	14 852	326 110
T - V	2 1/2	0,18	221 697	1 184	222 881
<b>TOTAL</b>		<b>7,82</b>	<b>4 259 000</b>	<b>106 700</b>	<b>4 365 700</b>

### 3.1.2. Dimensionamiento de la red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología Tradicional en gran altitud

Las condiciones iniciales para el escenario en altura son los que se presentan en la **Tabla 3.10**.

**Tabla 3.10. Condiciones ambientales en altura. Fuente: Elaboración propia**

Condiciones Iniciales	Magnitud
Temperatura Ambiental	8 °C
Altitud	3 800 msnm
Humedad Relativa	0 %

### Cálculo de la demanda real

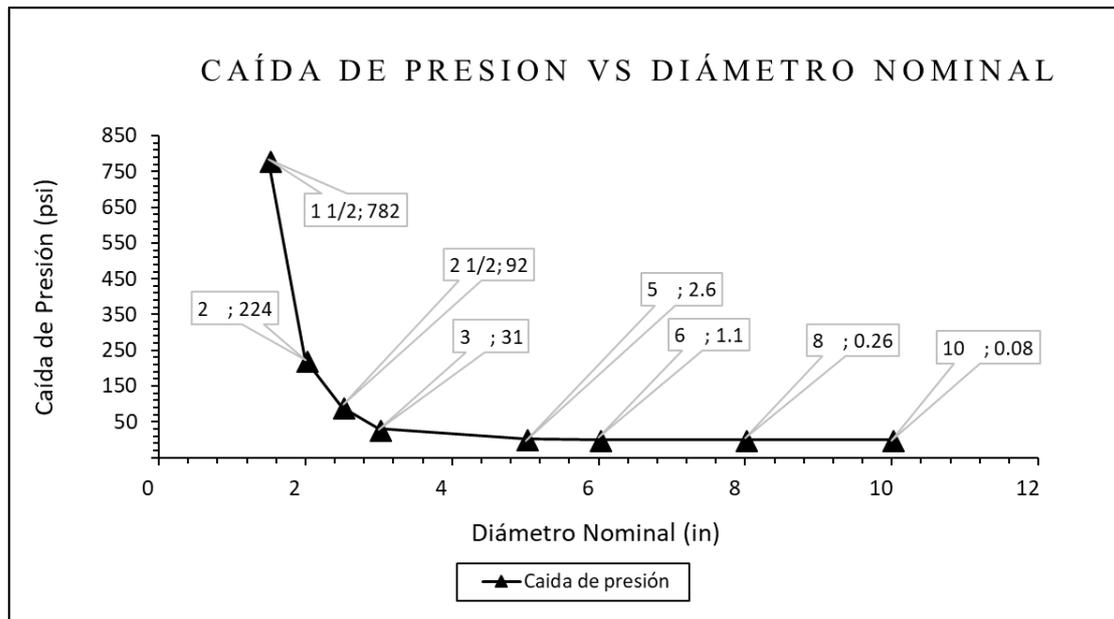
El caudal para una altura de 3800 m se muestra en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Caudal real en altura. Fuente: Elaboración Propia.

Herramientas	CFM/unidad	CFM altura	Presión de trabajo psig
Winche Neumático	390	390	116
Jack Leg	284	1419	90
Stopper	366	366	90
Jack Hammer	108	108	90
Wagon Drill	724	724	90
Pala Neumática	173	345	110
Necesidad Total		3 354	

### Dimensionamiento de la línea principal, tramo A-D

En la **Fig 3.5** se muestra la caída de presión para diferentes diámetros en el tramo A-D.



**Fig 3.5** Caída de presión vs diámetro interno para el tramo A-D de la mina modelo a 3800 m de altitud. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se puede observar, al comparar las **Fig 3.3y Fig 3.5**, existe mayor caída de presión en el sistema que se encuentra en altura y cuyo dimensionamiento se realizó con la metodología tradicional. En efecto, la altura afecta de forma negativa a los sistemas neumáticos a pesar de utilizar una conversión del caudal para las condiciones reales, ya que existe mayor caída de presión, lo cual significa mayor pérdida de energía.

### **Dimensionamiento de la red suministro**

Luego de aplicar el mismo proceso de selección de diámetro para cada tramo, Tabla 3.7, se obtiene el dimensionamiento completo de la red, en términos de tuberías lineales, el mismo que se presenta en la **Tabla 3.12**.

**Tabla 3.12.** Diseño de la red de distribución en altura, a 3800 m, con metodología tradicional.

Fuente: Elaboración propia

<b>Tramo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Presión de entrada</b>	<b>Presión de Salida</b>	<b>Caída de Presión</b>
-	<b>m</b>	<b>in</b>	<b>psia</b>	<b>psia</b>	<b>psi</b>
A - D	130	6	114	113	1,063
D - E	30	3	113	112	0,372
E - F	20	2	112	112	0,652
D - H	60	5	113	112	0,795
H - I	30	3	112	111	0,543
H - K	60	5	112	111	0,406
K - L	30	2 1/2	111	111	0,415
K - O	30	5	111	111	0,133
O - P	50	2 1/2	111	110	0,919
O - T	100	3	111	109	2,680
T - V	10	3	109	108	0,149
Total	550				8,26

### **Cálculo del costo de explotación**

Luego de seleccionar el diámetro óptimo para cada tramo, en la Tabla 3.13 se muestra el costo de operación y el costo de instalación. La suma de estos dos costos se muestra en la siguiente columna, la cual representa el costo de explotación.

**Tabla 3.13.** Costo de explotación de la red de suministro en altura. **Fuente:** Elaboración propia

Tramo	D_nom	$\Delta P$	Costo de Operación	Costo de Instalación	Costo de Explotación
-	in	psi	USD	USD	USD
A - D	6	1,06	1 297 971	55 566	1 353 537
D - E	3	0,37	257 809	4 456	262 265
E - F	2	0,65	146 140	1 859	147 999
D - H	5	0,80	1 028 931	18 945	1 047 875
H - I	3	0,54	312 591	4 456	317 047
H - K	5	0,41	704 470	18 945	723 415
K - L	2 1/2	0,42	146 578	3 552	150 130
K - O	5	0,13	546 444	9 472	555 917
O - P	2 1/2	0,92	169 140	5 920	175 060
O - T	3	2,68	378 822	14 852	393 674
T - V	3	0,15	262 224	1 485	263 709
TOTAL		8,12	5 251 119	139 508	5 390 628

### 3.1.3. Dimensionamiento de red de suministro de aire comprimido empleando la Metodología Mejorada en gran altitud

#### Cálculo de la demanda en función del flujo másico

Empleando la metodología mejorada, se hicieron los cálculos en base al flujo másico que se tomó de las condiciones estándar ( $P=14.64$  psi,  $T=20$  °C) el cual es 1,193 kg/s a partir de 2 127 cfm y una densidad de 1,189 kg/m<sup>3</sup>. De esta manera los equipos neumáticos operan en el rango nominal para el que fueron diseñados.

Para calcular el flujo másico en el tramo A-D del modelo de mina se tiene:

$$\dot{m} = SCFM * \rho$$

En donde a condiciones estándar

$$\dot{m} = 2\,127 \frac{ft^3}{min} * 0,0283168 \frac{m^3}{ft^3} * \frac{1\,min}{60\,s} * 1,189 \frac{kg}{m^3} = 1,193 \frac{kg}{s}$$

**Tabla 3.14.** Demanda de flujo másico para cada tipo de equipo neumático.  
Fuente: Elaboración propia.

Herramientas	Flujo másico kg/s
Winche Neumático	0,1388
Jack Leg	0,5047
Stoper	0,1300
Jack Hammer	0,0385
Wagon Drill	0,2573
Pala Neumática	0,1227
<b>Total</b>	<b>1,1923</b>

### Propiedades del aire a la salida del compresor

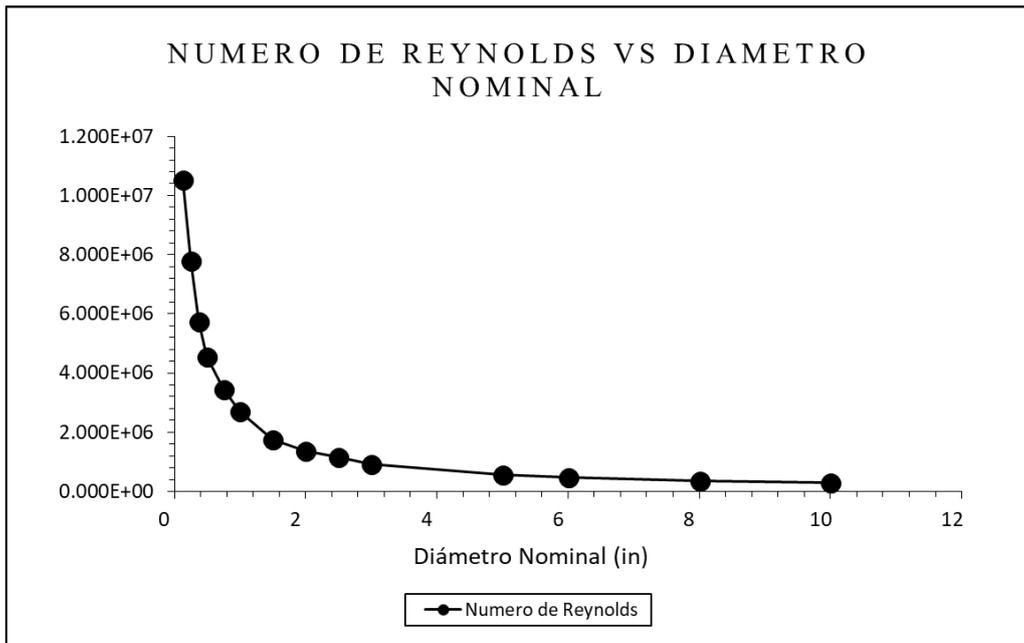
Considerando que a la salida del compresor la temperatura del aire es de 150 °C [5] con una presión absoluta de 114,2 psi (787 kPa) la cual desciende hasta 80 °C luego de pasar por el sistema de enfriamiento. Las propiedades del aire calculadas por el programa *Engineering Equation Solver*; se muestran a continuación:

$$\mu = 2,11 * 10^{-5} \text{ kg/m.s} \quad \rho = 8,77 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0,7061$$

Con estas propiedades se calculó el Número de Reynolds para tubos circulares en este tramo para cada diámetro de tubería teniendo como resultado la gráfica que se muestra en la **Fig 3.6**. Se utiliza la ecuación (9) de la sección 1.2.4:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\mu \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 * 1,193}{2,11 * 10^{-5} \cdot \pi \cdot D}$$



**Fig 3.6** Número de Reynolds para cada diámetro de tubería en el tramo A-D del modelo de mina utilizando la metodología mejorada. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Fig 3.6 se muestra que a menor diámetro mayor número de Reynolds debido a la falta de espacio para que el flujo se ordene. Las fuerzas de inercia son mayores a las fuerzas viscosas.

En este sentido, al incrementarse el número de Reynolds, el régimen es más turbulento, considerándose un flujo turbulento cuando este es mayor a 2 000.

Terminado este proceso ya se cuentan con las variables necesarias para calcular la caída de presión para cada diámetro, pues esta se utiliza en el cálculo de la caída de presión con la ecuación de Darcy.

### **Dimensionamiento de la línea principal, tramo A-D**

En la Fig 3.7 se observan los resultados de utilizar la ecuación (11); para hallar la caída de presión en el primer tramo del modelo de mina en base al flujo másico, con las condiciones iniciales de la Tabla 3.10.

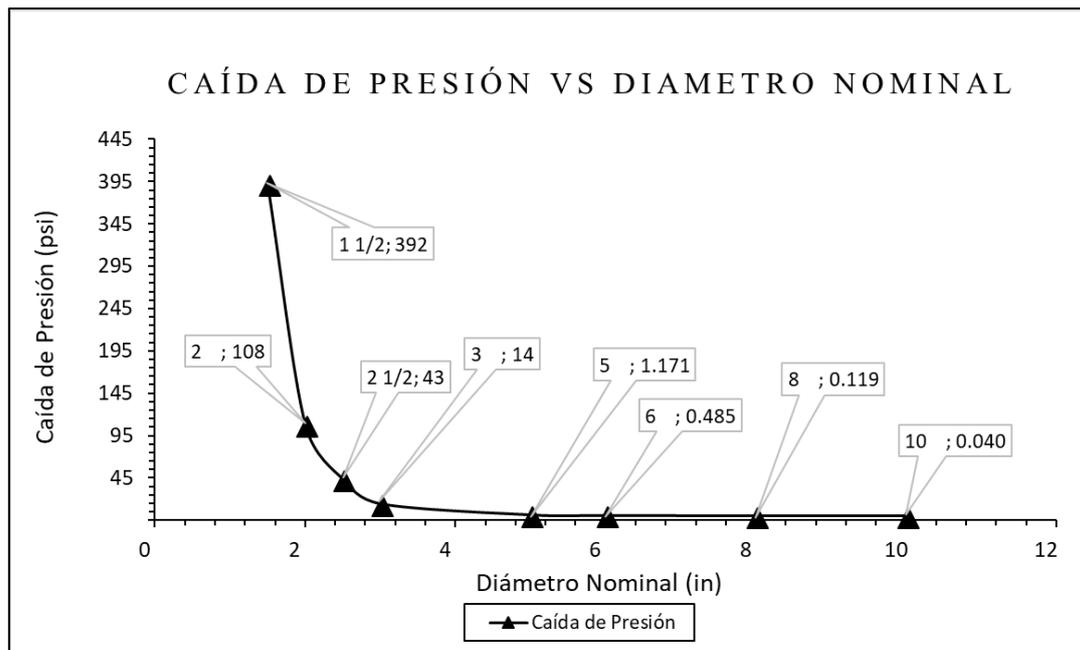


Fig 3.7 Caída de presión vs diámetro interno para el primer tramo del modelo de mina a 3800 m de altitud utilizando la metodología propuesta

Fuente: Elaboración Propia. Utilizando Microsoft Excel.

Al comparar la Fig 3.5 y la Fig 3.7 se aprecia una gran diferencia en las caídas de presión para cada diámetro nominal de tubería. Siendo menores las caídas de presión obtenidas con la metodología mejorada. Esto quiere decir que, al realizar el dimensionamiento completo, se podría reducir la presión a la que trabaja el compresor, es decir, realizar la compra de un compresor con menor ratio de compresión, pues no sufriría gran caída de presión como se calculó con la metodología tradicional, lo que en términos económicos representa menor costo de inversión. Esto a su vez repercute en los costos de operación, reduciendo los costos de energía eléctrica para la generación de aire comprimido y el costo de mantenimiento.

El diámetro que se seleccionó para tramo A-D es 8 in pues presenta el menor costo de explotación al sumar los costos por caídas de presión y de instalación de la tubería para este tramo. Como se aprecia en la Fig 3.7, para un diámetro interno de 203,45 mm, (8 in), la caída de presión es de 0,119 psi. Para estudiar el comportamiento del fluido y validar los resultados se simuló el comportamiento de este, lo cual se presenta a continuación.

### Validación de los resultados obtenidos

Se modeló un cilindro, el cual representara la zona del flujo interno de una tubería, con las características que se muestran en la Tabla 3.15

Tabla 3.15 Característica del cilindro modelado. Fuente: Elaboración propia.

Características	Magnitud	Unidad
Diámetro	203,45	mm
Longitud	5	m

Posteriormente se hizo el enmallado del cilindro utilizando la opción multi-zonas y mejorando la malla con tasas de crecimiento, como se muestra en la Fig 3.8.

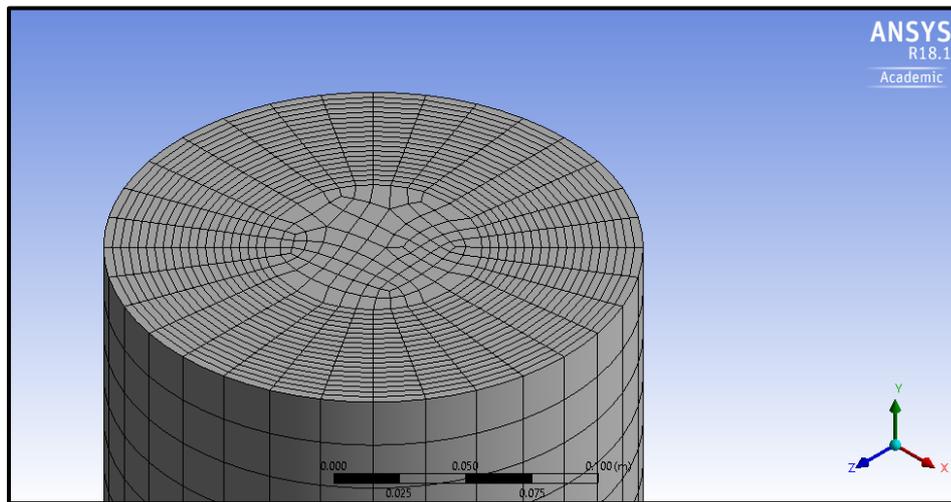


Fig 3.8 Enmallado del cilindro que se simuló con diámetro 253.45 mm y 5 m de largo.  
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procedió al establecimiento de las condiciones de frontera para simular la caída de presión en el tramo A-D de la red de suministro a 3 800 m de altitud, utilizando la metodología mejorada.

Para simular el escenario del tramo A-D de la red se ingresaron los valores de condiciones de frontera que se muestran en la **Tabla 3.16**

**Tabla 3.16** Condiciones de frontera para la simulación del primer tramo. Fuente: Elaboración Propia.

Condición de Frontera	Magnitud	Unidad
Velocidad de entrada	4,73	m/s
Presión de salida	786	kPa

De la simulación se obtuvo el mapa de calor de la caída de presión, velocidad, densidad, etc. En la Fig 3.9 se muestra la caída de presión y distancia longitudinal de la tubería, tomando como referencia la cara de ingreso (inlet).

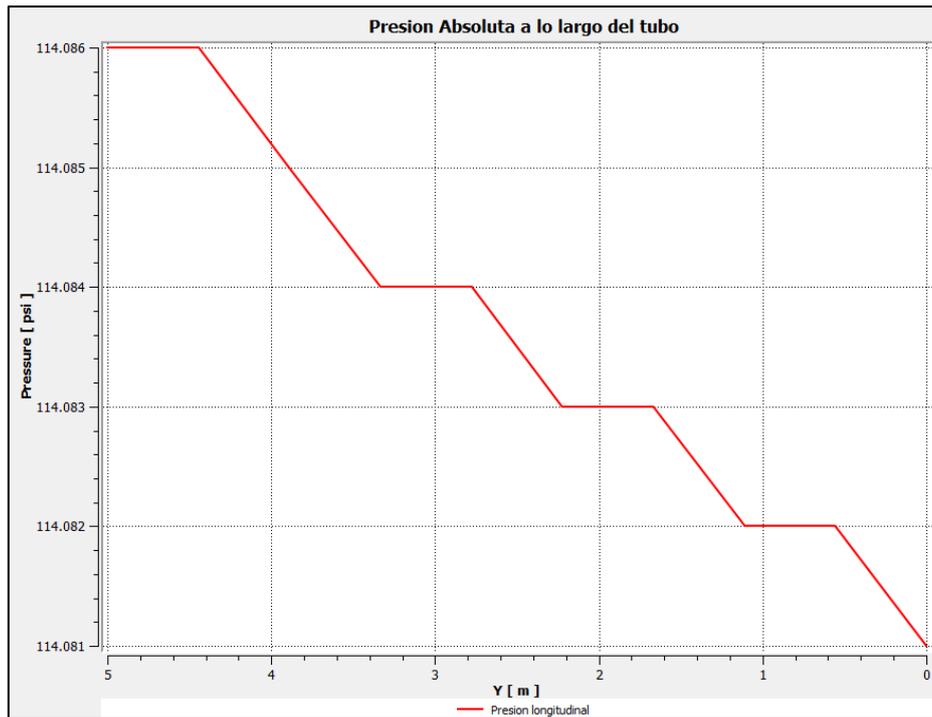


Fig 3.9 Gráfica caída de presión (psi) vs distancia longitud de la tubería  
Fuente Elaboración propia utilizando Ansys Workbench.

En la Fig 3.9, se observa que a medida que avanza el fluido desde el inlet ( $y=5$ ) hasta llegar a la salida ( $y=0$  m), la presión disminuye debido a la fricción por las fuerzas viscosas.

En la Tabla 3.17 se muestran los valores de la presión a la entrada y la salida de la tubería, así como la caída de presión. Adicionalmente, el comportamiento del gráfico es lineal. Es decir, se puede aplicar proporcionalidad para hallar la caída de presión en una tubería con las mismas características y condiciones iniciales, pero con mayor o menor longitud.

Tabla 3.17 Presiones a la salida y a la entrada de la tubería simulada y caída de presión. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Presión en la entrada psi</b>	<b>Presión en la salida psi</b>	<b>Caída de presión psi</b>
114,086	114,081	0,005

Como se puede observar en la Tabla 3.17, los resultados de la simulación, muestran las presiones a la entrada y a la salida de la tubería, cuya diferencia es la caída de presión.

Para corroborar los datos obtenidos con la metodología mejorada, estos fueron comparados con los resultados obtenidos en la simulación.

Debido a que la caída de presión tiene un comportamiento lineal respecto a la longitud de la tubería, entonces se puede aplicar la proporcionalidad para calcular la caída de presión en una longitud de 130 m. Con lo cual la presión resulta de 0.13 psi, como se observa a continuación:

$$\Delta P = 0,005 * \frac{130}{5} = 0,13 \text{ psi}$$

De lo anterior, 130 m es la longitud de la tubería del tramo A-D, mientras que 5 m es la longitud de la tubería con la que se realizó la simulación. Al aplicar las proporciones, se calcula que el porcentaje de error de la caída de presión es de 8,5%.

$$\text{Error}\% = \frac{(0,13 - 0,12)}{0,13} = 8,46\%$$

Con esto queda probado que la metodología mejorada calcula eficientemente el comportamiento del fluido en la realidad, con el uso adecuado de la ecuación de Darcy.

### Dimensionamiento de la red de suministro

Aplicando la metodología mejorada para cada tramo de la red se obtienen los diámetros. Estos se presentan en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Diseño de red de distribución en altura, a 3800 m con metodología propuesta Fuente: Elaboración propia.

Tramo	Longitud	Diámetro	Presión de entrada	Presión de Salida	Caída de Presión
-	m	in	psia	psia	psi
A - D	130	5	114	113	1,12
D - E	30	2 1/2	113	113	0,46
E - F	20	2	113	112	0,26
D - H	60	5	113	113	0,35
H - I	30	3	113	112	0,23
H - K	60	5	113	113	0,18
K - L	30	2	113	112	0,40
K - O	30	3	113	112	0,66
O - P	50	2	112	111	0,87
O - T	100	3	112	111	1,08
T - V	10	2 1/2	111	111	0,17
Total					5,86

La selección de los diámetros se hizo en función al balance de costos por operación para cada diámetro y al costo de inversión de cada diámetro para cada tramo

de la red. En este sentido, los diámetros seleccionados representan el menor costo de explotación anual.

### Cálculo del costo de explotación

En la **Tabla 3.19** se muestra al costo de operación y el costo de instalación de la red de suministro. La suma de estos dos es el costo de explotación de la red de suministro.

**Tabla 3.19.** Costo de explotación de la red de suministro con metodología propuesta. **Fuente:** Elaboración propia

Tramo -	D_nom in	$\Delta P$ psi	Costo de Operación USD	Costo de Instalación USD	Costo de Explotación USD
A - D	5	1,17	1 246 160	41 047	1 287 208
D - E	2 1/2	0,46	247 822	3 552	251 374
E - F	2	0,26	140 065	1 859	141 925
D - H	5	0,35	982 830	18 945	1 001 775
H - I	3	0,23	298 756	4 456	303 212
H - K	5	0,18	674 290	18 945	693 235
K - L	2	0,40	140 824	2 789	143 613
K - O	3	0,66	526 309	4 456	530 765
O - P	2	0,87	162 020	4 649	166 668
O - T	3	1,08	358 257	14 852	373 109
T - V	2 1/2	0,17	251 476	1 184	252 660
<b>TOTAL</b>		<b>5,82</b>	<b>5 028 810</b>	<b>116 734</b>	<b>5 145 544</b>

Como se muestra en la **Tabla 3.19**, el costo de explotación para la red de suministro con la metodología propuesta es de \$5 145 544.

#### 3.1.4. Análisis de Resultados

Los costos entre los diferentes casos y con diferentes metodologías, mantienen resultados diferentes. Los resultados obtenidos con la metodología mejorada, para el caso de altura, tienen un menor costo. Esto gracias a que se realiza un cálculo más exacto al utilizar el flujo másico como unidad base para las distintas ecuaciones.

A continuación, en la **Tabla 3.20** se muestran los costos de inversión y de operación para cada metodología:

**Tabla 3.20. Costos de las tres metodologías. Fuente: Elaboración propia**

	<b>Inv. Tuberías</b>	<b>Costo Operación anual</b>	<b>Costo Explotación anual</b>
<b>Estándar</b>	106 700	4 259 000	4 365 700
<b>M. Tradicional</b>	139 508	5 251 119	5 390 628
<b>M. Mejorado</b>	116 734	5 028 810	5 145 544

Se aprecia que existe un ahorro de \$245 000 en el primer año al utilizar la metodología mejorada y de \$220 000 en los años siguientes.

### 3.2. CASO 2: Dimensionamiento de redes de suministro de aire para la operación de Celdas de Flotación en Plantas Concentradoras de Cu

Al salir los minerales de la mina son trasladados a las plantas de concentración. El proceso de concentración a usar dependerá del tipo de mineral presente. De este modo para el caso del Cu se utilizan celdas de flotación, véase Fig. 3.10, para separarlo del no mineral. La teoría relacionada a este tema se puede ver en el anexo 7.7.1. Como se menciona en la teoría, para tener un alto porcentaje de concentrado de Cu es necesario que este pase por diferentes etapas de flotación, tras cada etapa el grado de concentración aumenta.

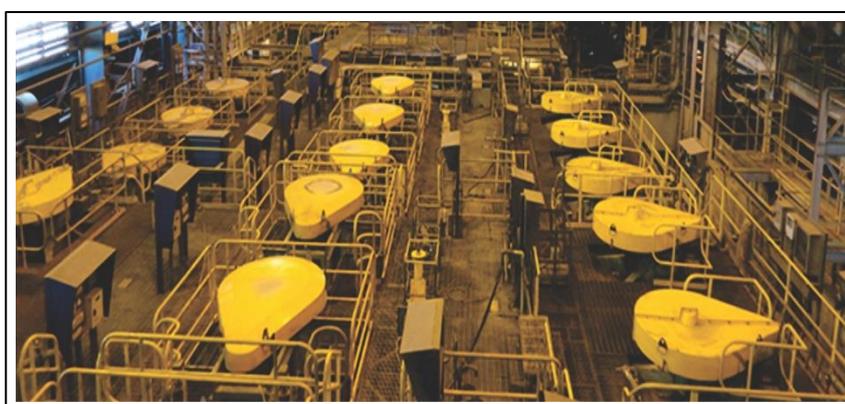


Fig. 3.10. Celdas de flotación. Fuente [39]

#### 3.2.1. Dimensionamiento de la red de suministro de aire empleando la Metodología Tradicional en Condiciones Estándar

##### Cálculo de la demanda en condiciones estándar

Se tienen las consideraciones presentadas en la **Tabla 3.21**. En esta tabla se muestran los datos importantes para poder diseñar una adecuada red de suministro de aire.

**Tabla 3.21.** Cálculo de la demanda de aire en las celdas de flotación. **Fuente:** Elaboración Propia.

Descripción	Capacidad (ft3)	Cantidad	Cap. Total (ft3)	Flujo de aire/celda (scfm)	Flujo de aire (scfm)	Presión (psig)
Celdas Rougher	1 059	28	29 660	530	14 830	9,86
Celdas Cleaner Bulk	883	12	10 593	424	5 085	9,86
Celdas Rougher Molibdeno	530	4	2 119	424	1 695	9,86
Celdas Columna	441	6	2 648	636	3 813	9,86
Celdas Cleaner Scavenger Cu	7 168	4	28 672	424	1 695	9,86
Total			73 692		27 118	

Como se puede apreciar en la **Tabla 3.21**, el flujo de aire es variable para los cinco tipos de celdas y al sumar el total se obtiene el flujo necesario para tener un correcto proceso de flotación el cual es 27 118 scfm. Además, a diferencia del caso anterior, las celdas trabajan en producción continua, por lo que su grado de utilización es 1 y por ende la demanda de flujo de aire se mantiene constante. Por otro lado, por motivos de simplificación de cálculo, se considera que la presión de ingreso del aire a los 5 tipos de celdas es la misma. Por otra parte, al ser un proceso físico químico, se debe ser muy preciso con la presión y caudal de aire para que el proceso sea eficiente. De lo contrario, una alta presión provocaría que la burbuja explote en el camino hacia la superficie y el mineral caiga a la cola que se dirige a los relaves. Mientras que un alto caudal provocaría que haya una alta suspensión de impurezas que reducirían la calidad del concentrado.

Para el dimensionamiento de las redes de suministro de aire a las celdas de flotación se suele seguir la trayectoria más óptima, por ende, la mejora queda en el cálculo de la demanda y capacidad que debe tener esta red de suministro de aire. En la Fig 3.11 se aprecia el esquema de la red de suministro de aire para este caso de estudio. Así mismo, las longitudes de los tramos se muestran en la **Tabla 3.22**

**Tabla 3.22.** Longitud de tramos del esquema de la Fig 3.11. **Fuente:** Elaboración propia.

<b>Tramo</b>	<b>Longitud (m)</b>
A B	3
C D	3
E F	3
G H	3
B D	4
D I	4
F I	4
H F	4
I P	5
K L	6
K M	5
M J	5
M N	180
J O	5
J P	4
P Q	180
P R	4
R S	5
R T	5
T U	180
T V	5
V W	5
V X	5
X Y	210
X Z	5
Z AA	150

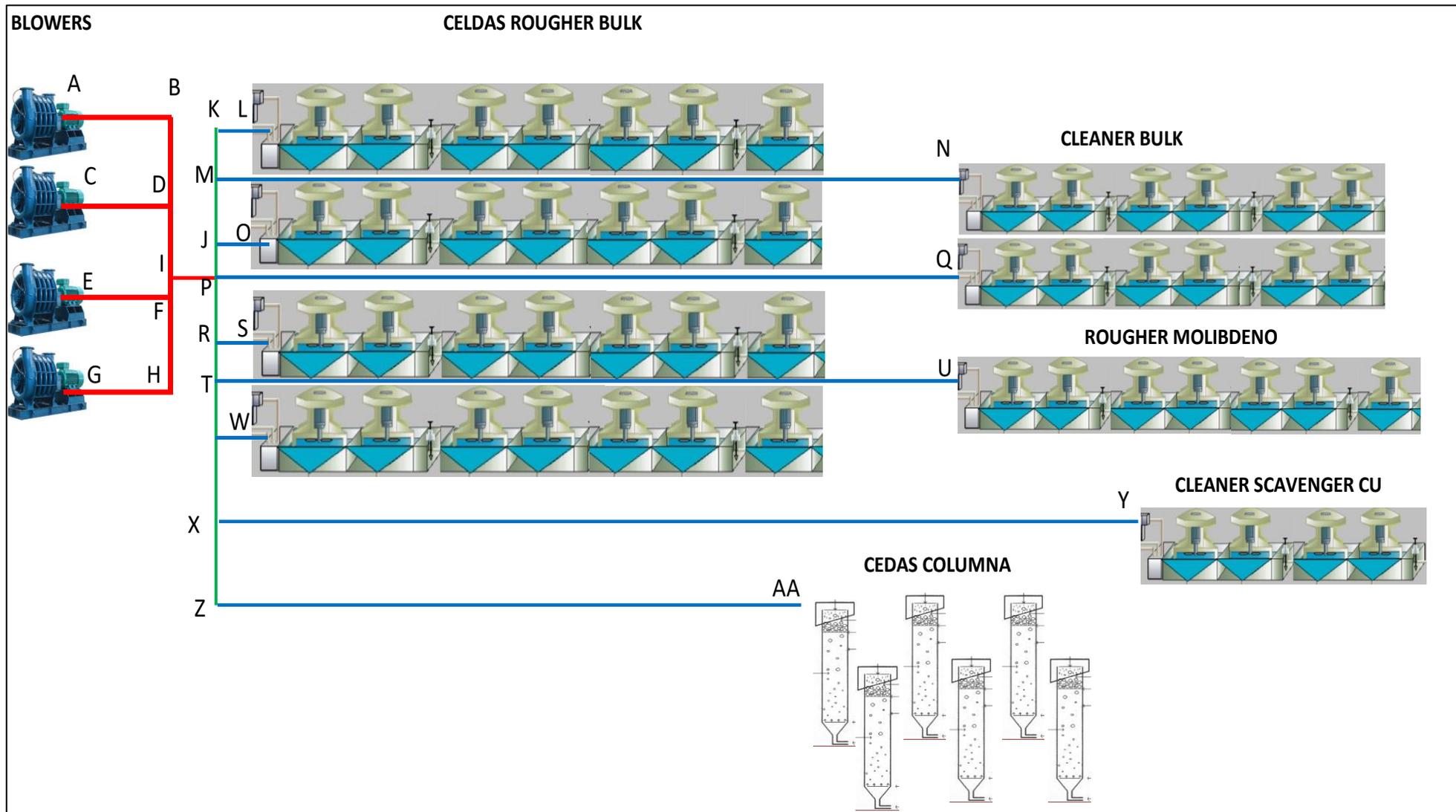


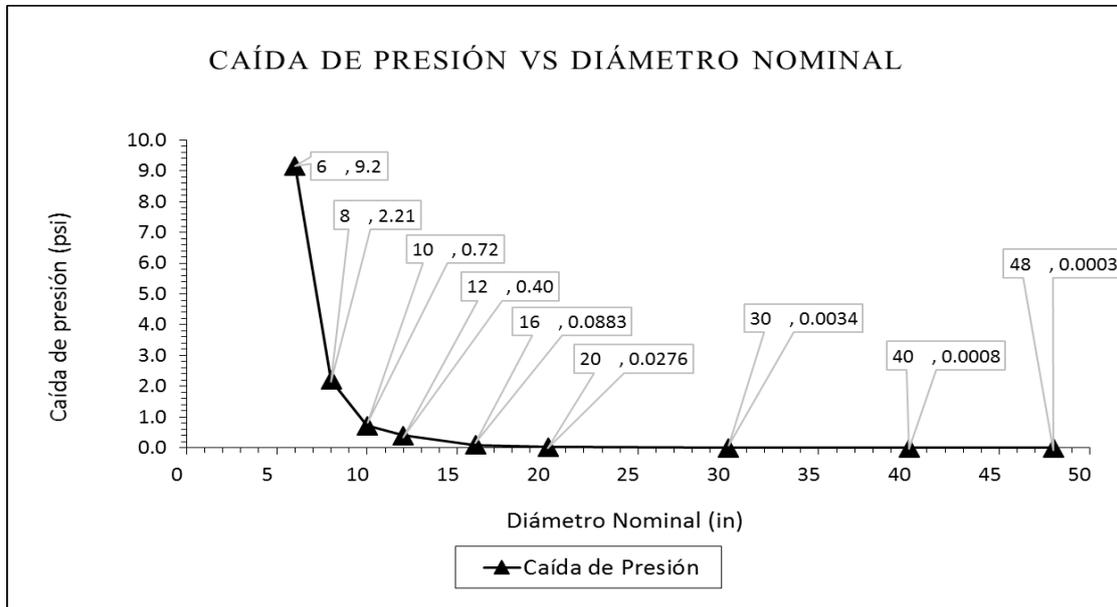
Fig 3.11. Esquema de etapas de Celdas de Flotación.  
Fuente: Elaboración propia.

## Dimensionamiento de la línea principal, tramo I - P

Conocida la demanda de aire se procede a realizar los cálculos de la caída de presión y con ello el dimensionamiento. Para ello se calcula la caída de presión en el tramo I –P para cada diámetro. Los resultados se muestran en la Tabla 3.23 y el comportamiento en la Fig 3.12.

**Tabla 3.23. Resultados de la caída de presión y costos de instalación y operación. Fuente: Elaboración propia.**

D_nom in	$\Delta P$ psi	Costo de Operación anual USD	Costo de Instalación USD	Total Anual USD
1/8	51 733 403	2 015 103 736 146	196	2 015 103 736 343
1/4	11 403 168	444 173 468 171	204	444 173 468 375
3/8	2 502 061	97 460 410 351	213	97 460 410 564
1/2	782 673	30 487 386 542	224	30 487 386 765
3/4	191 821	7 472 702 528	249	7 472 702 777
1	57 366	2 235 452 998	281	2 235 453 279
1 1/2	6 736	263 327 954	361	263 328 315
2	1 931	76 172 828	465	76 173 293
2 1/2	794	31 884 079	592	31 884 671
3	268	11 390 818	743	11 391 561
5	22	1 815 609	1 579	1 817 188
6	9,2	1 305 472	2 137	1 307 609
8	2,21	1 034 942	3 535	1 038 476
10	0,72	976 964	5 306	982 270
12	0,40	964 613	7 452	972 065
16	0,0883	952 304	12 866	965 170
20	0,0276	949 937	19 777	969 714
30	0,0034	948 995	43 603	992 598
40	0,0008	948 893	76 784	1 025 677
48	0,0003	948 875	110 064	1 058 939

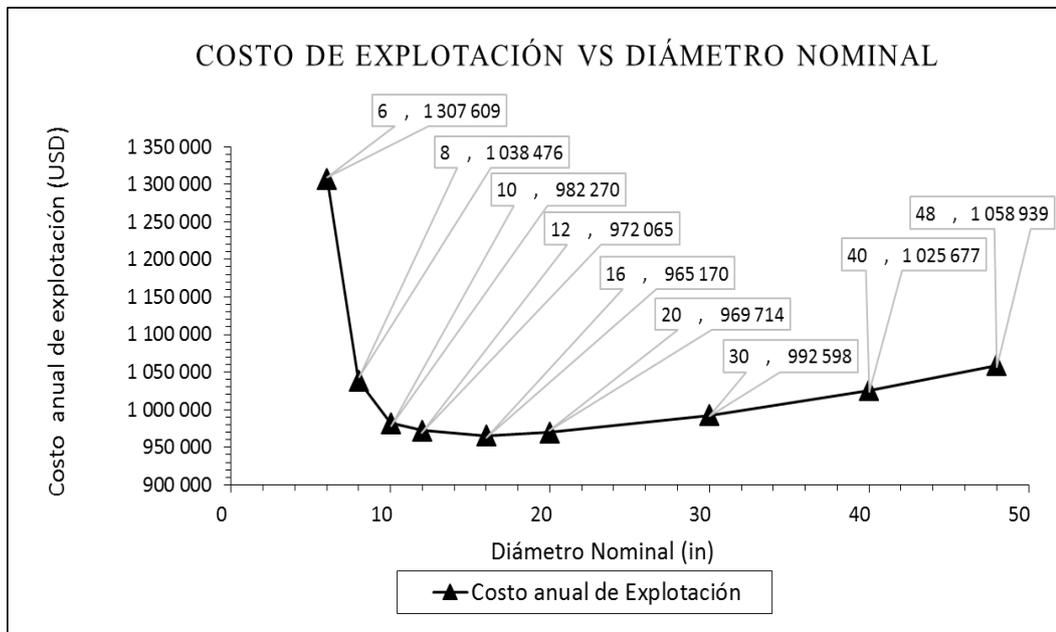


**Fig 3.12. Caída de presión vs diámetro para la línea principal en condiciones estándar. Fuente: Elaboración propia**

### Cálculo del costo de explotación

Una vez calculadas las caídas de presión para diferentes diámetros se procede con el cálculo del costo de inversión y con el cálculo de energía anual por operación para cada uno. Acto seguido se calcula el costo de explotación anual de forma general sumando el costo de inversión con el costo de operación de cada tramo como se muestra en la Tabla 3.23. De ella se presenta en la Fig 3.13 el costo de explotación anual para tramo I - P con el diámetro óptimo.

En la Fig 3.13 se observa que para el tramo I-P el menor costo de explotación es de \$965 000 y se presenta cuando el diámetro de la tubería es 16 in. Este es el diámetro óptimo para este tramo. Luego de calcular el diámetro óptimo para cada tramo se realiza la Tabla 3.24 en donde se muestra el costo de explotación del sistema.



**Fig 3.13.** Costo de explotación vs diámetro nominal para la línea principal en condiciones estándar: **Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.24.** Costo de explotación del sistema de suministro con metodología tradicional. **Fuente:** Elaboración propia

Tramo	D_nom	$\Delta P$	Costo de Operación Anual USD	Costo de Instalación USD	Total Anual USD
-	in	psi			
I-L	16	0,09	952 304	12 866	965 170
K-L	6	0,28	131 301	2 137	133 438
M-N	6	4,15	102 676	76 937	179 613
T-U	6	5,52	125 562	76 937	202 499
X-Y	5	5,60	70 748	66 307	137 055
Z-AA	6	7,33	168 599	64 114	232 713
Total			1 551 188	299 726	1 850 915

### 3.2.2. Dimensionamiento de la red de suministro de aire empleando la Metodología Tradicional en gran altitud

#### Cálculo de la demanda real

Se presentan las condiciones medio ambientales en la Tabla 3.25 .En la Tabla 3.26 se presente el ACFM calculado para las condiciones de altura de acuerdo a la metodología tradicional.

**Tabla 3.25.** Condiciones ambientales del caso en altura. **Fuente:** Elaboración propia.

Descripción	SCFM	ACFM
Temperatura	8	°C
Presión Ambiental	9,2	psia
Humedad Relativa	0	%
Altitud	3 800	msnm

**Tabla 3.26.** Cálculo de la demanda en condiciones reales. **Fuente:** Elaboración propia.

Descripción	SCFM	ACFM
Celdas Rougher	14 830	24 059
Celdas Cleaner Bulk	5 085	8 249
Celdas Rougher Molibdeno	1 695	2 750
Celdas Columna	3 813	6 187
Celdas Cleaner Scavenger Cu	1 695	2 750
Total	27 118	43 994

### Dimensionamiento de la línea principal, tramo I – P

Se realiza el cálculo de la caída de presión en la línea principal para diferentes diámetros de tubería y los resultados se muestran en la Fig 3.14. En esta se puede apreciar que a mayor diámetro, menor es la caída de presión y además que el comportamiento de la relación no es lineal. La selección del diámetro óptimo depende del costo de explotación anual que se obtiene en el siguiente apartado.

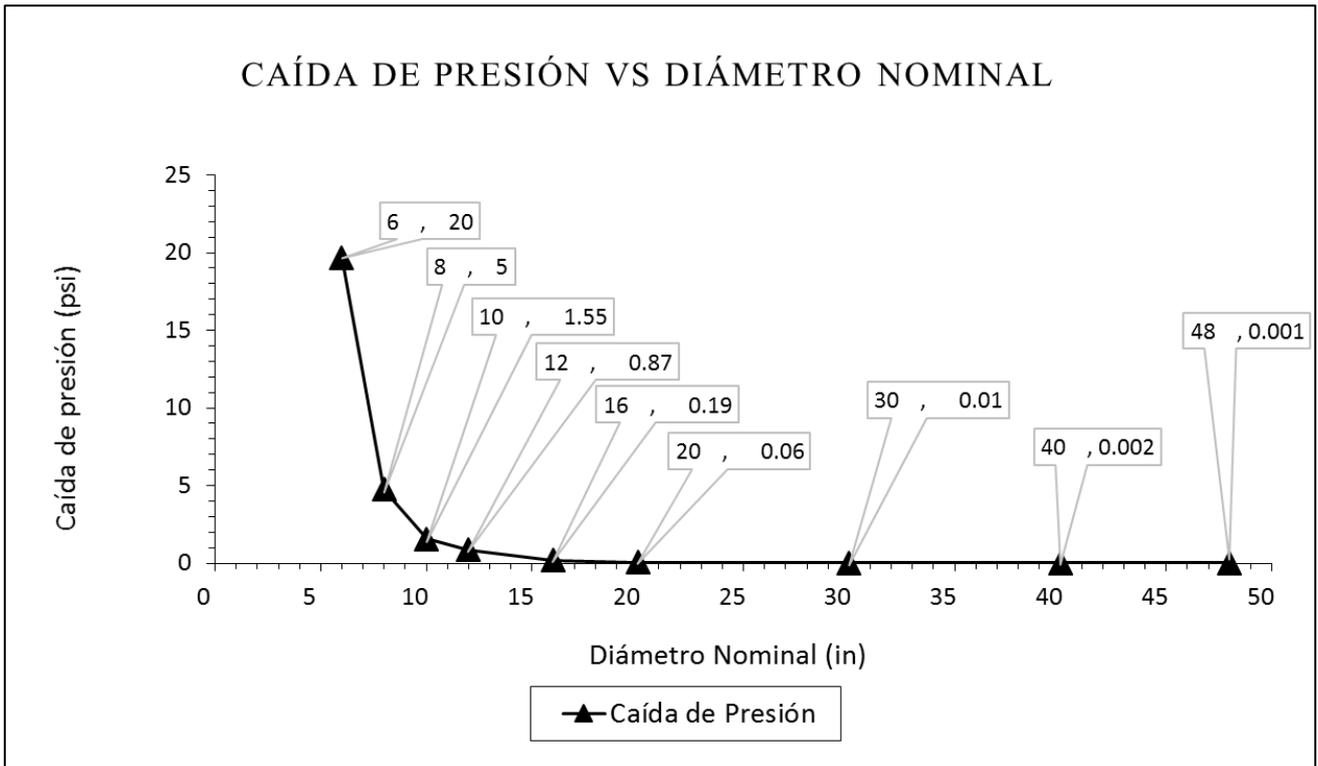


Fig 3.14. Caída de presión vs diámetro interno para la línea principal con metodología tradicional. Fuente: Elaboración propia

### Cálculo del costo de explotación

De forma similar al caso de estudio anterior, se calcula el costo de explotación para diferentes diámetros de la tubería principal y los resultados se muestran en la Fig 3.15.

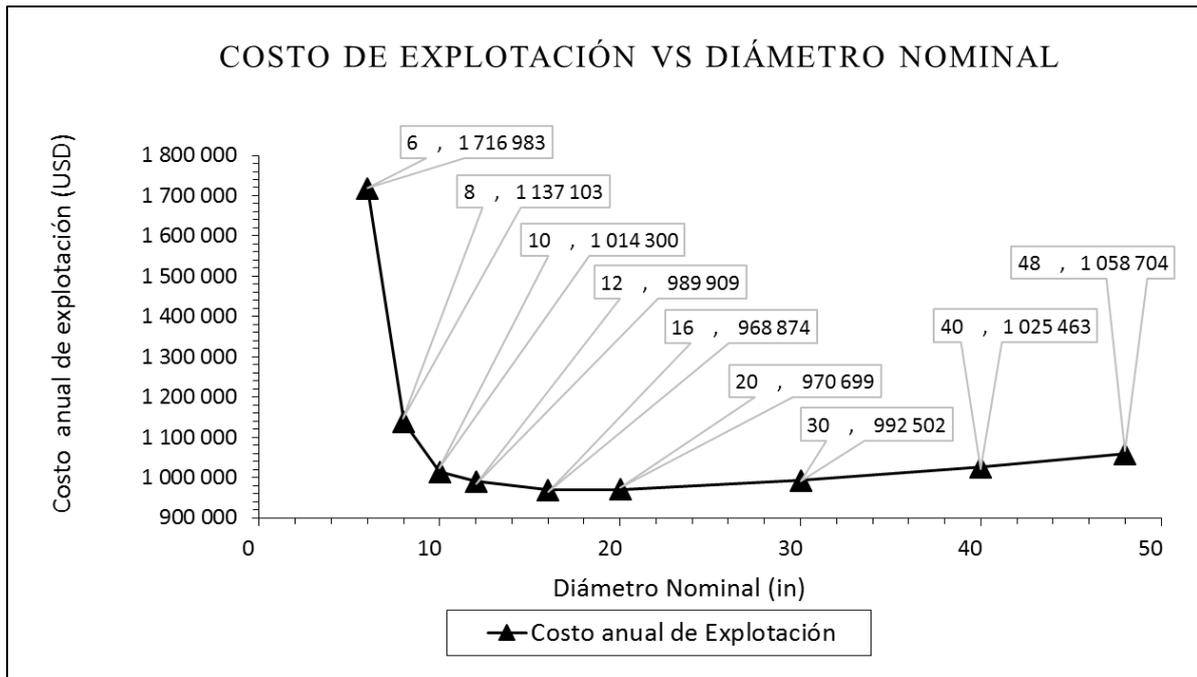


Fig 3.15. Costo anual de explotación vs diámetro nominal de la tubería principal con método tradicional.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig 3.15 se observa que el mayor costo de explotación anual se presenta para el menor diámetro (6 in). Esto se debe a que, al tener una sección tan reducida, el fluido no puede ordenarse de forma capilar y por el contrario entra en turbulencia, las fuerzas de inercia son mayor a las fuerzas viscosas. De modo diferente, el menor costo de explotación anual no se presenta en el mayor diámetro, sino que se presenta cuando el diámetro nominal es 16 in (406 mm) y el costo de explotación es \$968 000. Es cierto que el mayor diámetro genera las menores caídas de presión. Sin embargo, a mayores diámetros de tuberías, mayor es la complejidad de manufactura por lo que los precios se elevan considerablemente en la inversión. De esa manera este gráfico se obtiene al hacer una suma del costo de inversión con el costo de energía por operación.

Siguiendo la misma metodología para cada tramo, en la Tabla 3.27 se presentan los diámetros óptimos y el costo de explotación del sistema.

**Tabla 3.27.** Costo de explotación del sistema con metodología tradicional. **Fuente:** Elaboración propia

Tramo	D_nom	ΔP	Costo de Operación Anual	Costo de Instalación	Total Anual
-	in	psi	USD	USD	USD
I - P	16	0,19	956 008	12 866	968 809
K - L	8	0,15	130 158	4 241	134 399
M - N	6	8,95	120 840	76 937	197 777
T - U	6	11,90	152 160	76 937	229 097
X - Y	5	12,0	86 883	66 307	153 191
Z -AA	8	3,81	151 290	106 037	257 327
Total			1 597 339	343 326	1 940 665

En la Tabla 3.27 se aprecia que el costo de explotación para el sistema de suministro de aire con la metodología tradicional en gran altitud es de \$1 940 000. Este costo es el resultado de calcular el costo de energía por operación y el costo de inversión por la compra de tuberías.

### 3.2.3. Dimensionamiento de la red de suministro aire empleando la Metodología Mejorada en gran altitud

#### Cálculo de la demanda en función al flujo másico,

Ya obtenida la demanda de flujo volumétrico de aire libre suministrado en condiciones estándar, se procede a calcular el flujo másico. Para ello se utiliza la ley de los gases ideales. Para el uso de esta fórmula se utilizó unidades métricas:

$$P \cdot \dot{v} = R_{aire} \cdot T \cdot \dot{m}$$

$$100 \text{ kPa} \cdot 27118 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \cdot \left( \frac{28,3 \text{ L} \cdot 1 \text{ min}}{1 \text{ ft}^3 60 \text{ s}} \right) = 287 \frac{\text{L} \cdot \text{kPa}}{\text{°K} \cdot \text{kg}} \cdot 293 \text{°K} \cdot \dot{m}$$

$$\dot{m} = 15,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se obtiene que la demanda de caudal másico es 15,216 kg/s. Este es el valor con el que se realiza los cálculos para los siguientes pasos.

### Dimensionamiento de la línea principal, tramo I-P

Se utiliza la metodología mejorada para calcular la caída de presión para diferentes diámetros de la tubería principal. Los resultados se muestran en la Fig 3.16

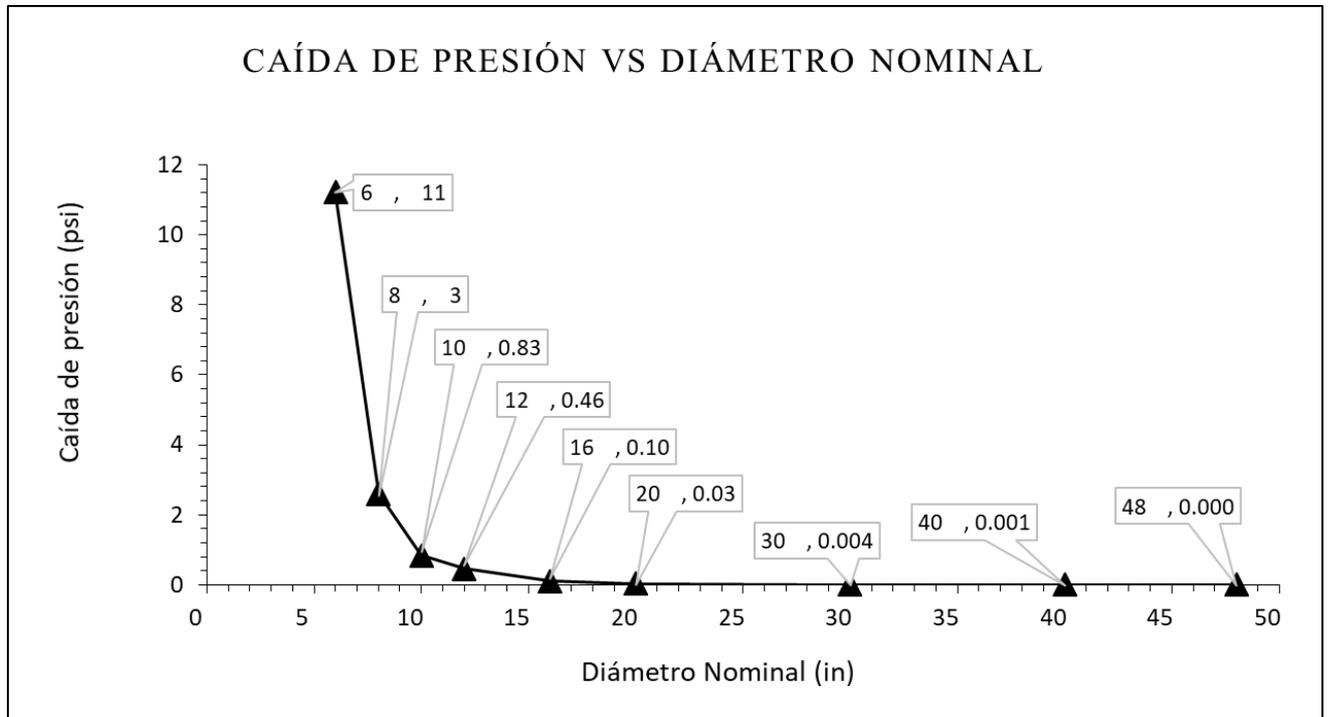


Fig 3.16. Caída de presión vs diferentes diámetros nominales para la línea principal con metodología mejorada.  
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la Fig 3.14 con la Fig 3.16 se aprecia que la caída de presión para cada diámetro es mayor con la metodología tradicional. Como consecuencia de que la caída de presión sea mayor, se requiere seleccionar un compresor con mayor capacidad. Esto hace que el costo de inversión sea mayor.

### Cálculo del costo de explotación

En la Fig 3.17 se observa la curva del costo de explotación vs el diámetro nominal para el tramo I - P. En esta se observa que el mayor costo de explotación se presenta cuando el diámetro nominal de la tubería es 6 in. La explicación es que al existir un gran caudal que debe circular por este ducto, la geometría no permite que el fluido se ordene y por el contrario se generan grandes caídas de presión, lo cual aumenta

considerablemente el costo de operación. Por otro lado, el diámetro óptimo para este caso es de 16 in resultando en un costo de explotación de \$963 809.

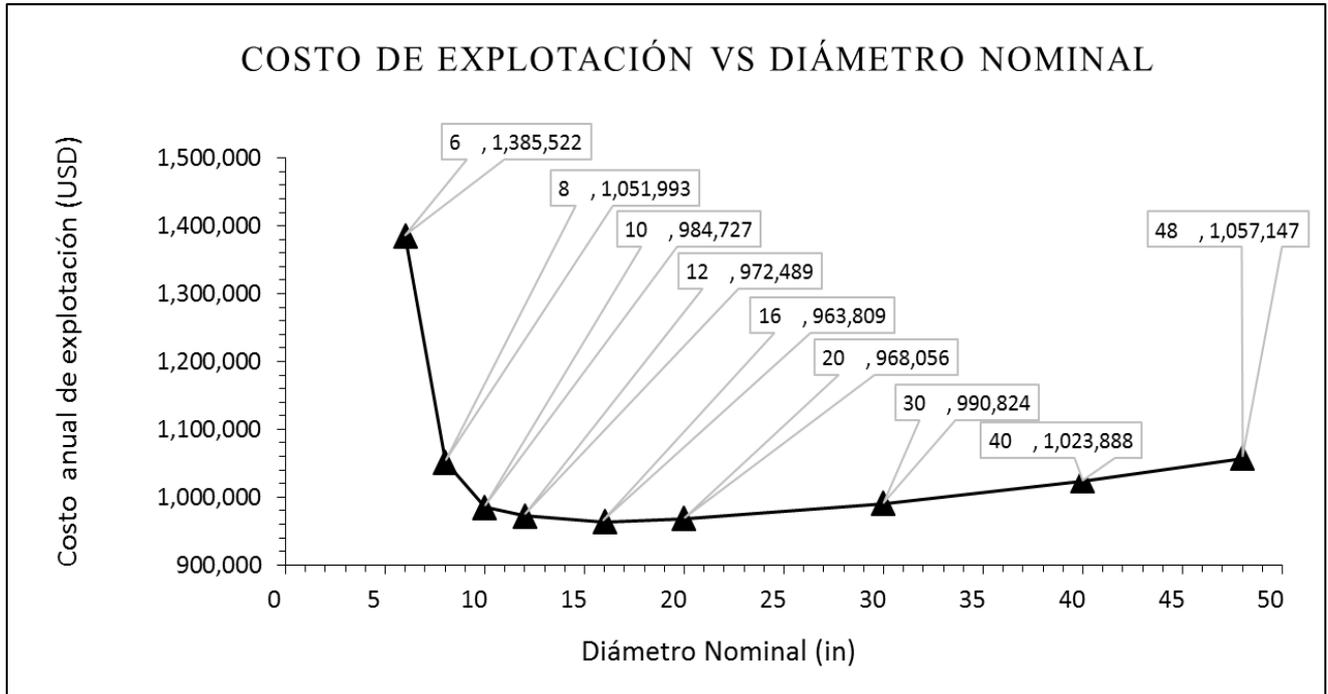


Fig 3.17. Costo anual de explotación vs diámetro nominal de la tubería principal con metodología mejorada. Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma se realizan los cálculos de explotación para cada tramo y los resultados se muestran en la Tabla 3.28

Tabla 3.28, Costo de explotación del sistema con metodología mejorada. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	D_nom in	$\Delta P$ psi	Costo de Operación Anual USD	Costo de Instalación USD	Total Anual USD
I - P	16	0,10	950 943	12 866	963 809
K - L	6	0,26	136 753	2 565	139 318
M - N	6	3,74	107 051	76 937	183 988
T - U	6	5,05	130 030	76 937	206 967
X - Y	5	4,81	73 675	66 307	139 983
Z -AA	6	6,5	173 909	64 114	238 023
Total			1 572 361	299 726	1 872 087

### 3.2.4. Análisis de Resultados

Al comparar el costo de explotación óptimo de la metodología tradicional con el de la metodología mejorada se aprecia que existe una diferencia de \$68 000 durante el

primer año al considerar el monto de inversión. Para los siguientes años el ahorro es de \$25 000, lo cual significa que la metodología mejorada proporciona un ahorro sustentable en los años de operación.

**Tabla 3.29. Análisis de resultados de CASO 2. Fuente: Elaboración propia.**

	<b>Inv. Tuberías</b>	<b>Costo Operación anual</b>	<b>Costo Explotación anual</b>
<b>Estándar</b>	299 726	1 551 188	1 850 915
<b>M. Tradicional</b>	343 326	1 598 933	1 942 259
<b>M. Mejorado</b>	299 726	1 572 361	1 872 087

### **3.3. Variación de la demanda con la Temperatura Ambiental**

La temperatura ambiental varía con el día en todos los lugares del mundo. Por ello puede resultar beneficioso tomar en consideración esta variación de temperatura, ya que, a mayor temperatura, menor densidad de aire y por conservación de masa y energía se debe aumentar el caudal volumétrico. En otras palabras, a mayor temperatura se debe inyectar mayor volumen al sistema, lo cual resulta en mayor trabajo de los compresores y por ende mayor consumo de energía eléctrica. Para simular este escenario se consideró la variación de temperatura que se muestra en la Fig 3.18

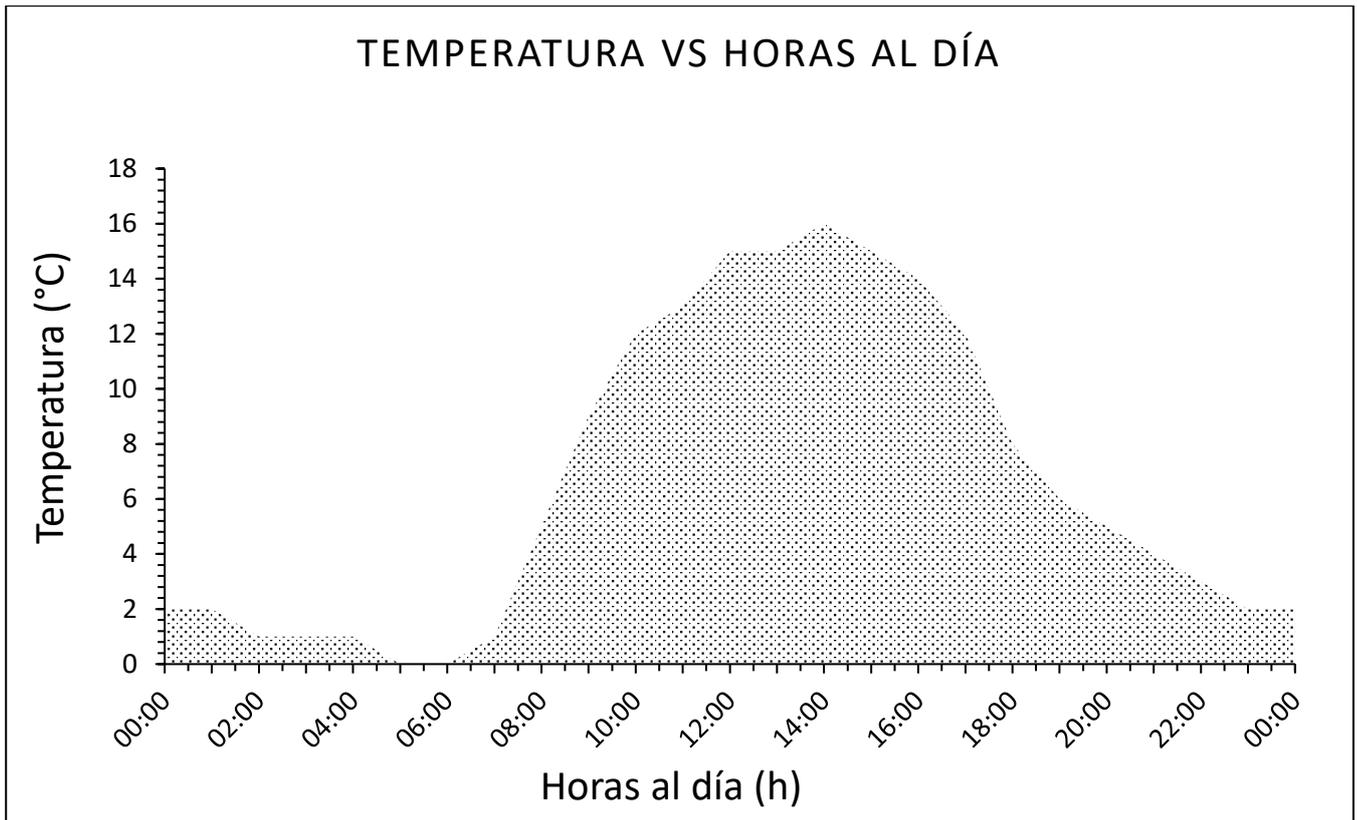
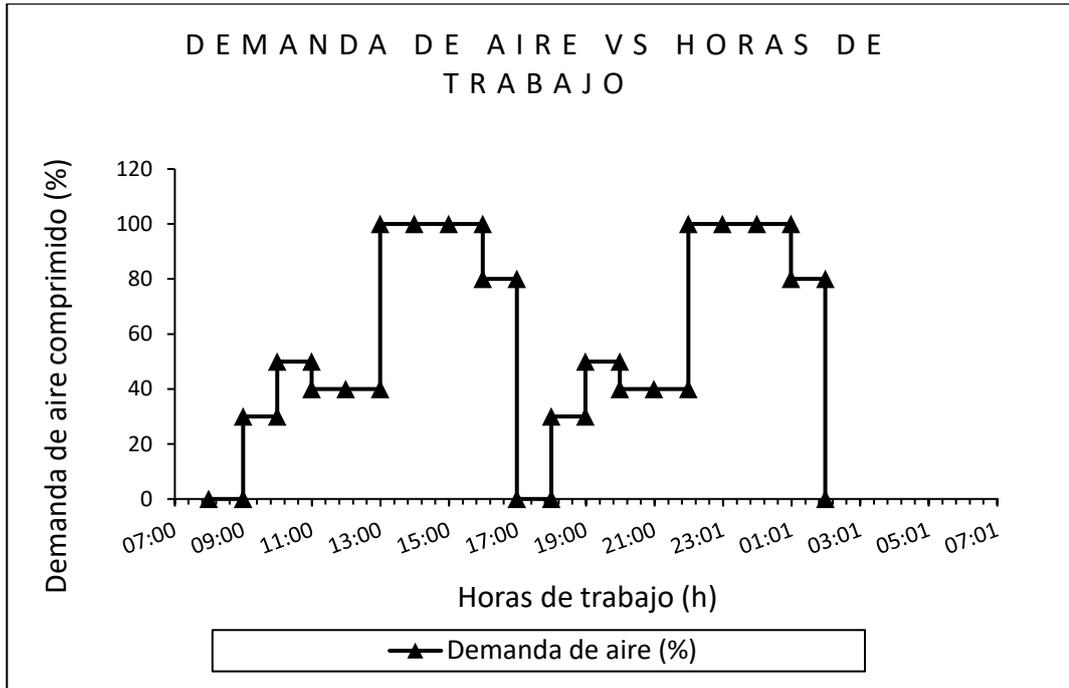


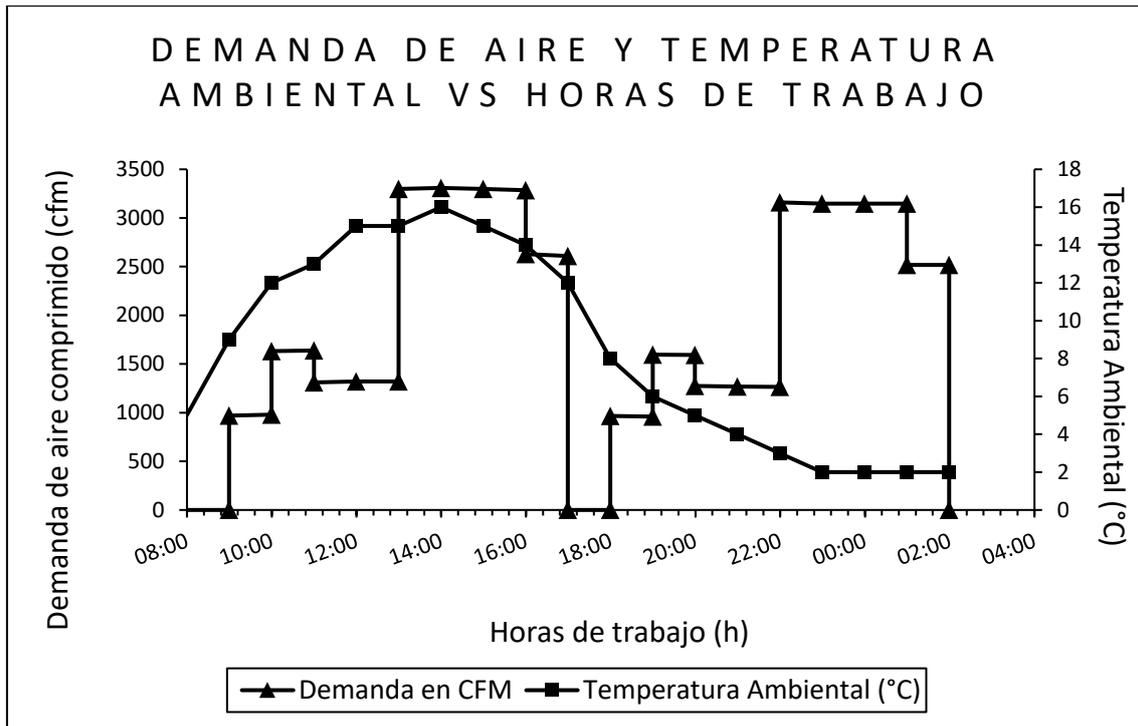
Fig 3.18. Variación de la temperatura en un día.  
Fuente: Wheater, temperatura por horas [38].

Conociendo la variación de temperaturas a lo largo de un día y la demanda del aire comprimido podemos conocer el caudal necesario a suministrar al sistema. Sin embargo, como se mencionó en el marco teórico, la minería subterránea tiene un ciclo de operación. En este, la demanda de aire comprimido no es constante y por consiguiente depende de las horas y la etapa del ciclo que se esté realizando. Para ello, se consideró que la demanda de aire comprimido se distribuye como se muestra en la **Fig 3.19**.



**Fig 3.19.** Demanda de aire comprimido (en porcentaje) vs horas de trabajo en el día. **Fuente:** [39].

Considerando las Fig 3.18, Fig 3.19 y el caudal volumétrico máximo para cada temperatura; se obtiene la **Fig 3.20**. En esta, se puede apreciar el caudal volumétrico para cada hora. Como se puede apreciar, entre la 1 pm y 4 pm y entre las 10 p.m. y 1 a.m. se da la máxima demanda. Adicionalmente, la temperatura máxima se presenta a las 2 p.m. Es decir, la temperatura máxima se da cuando se presenta la demanda máxima. En consecuencia, el caudal volumétrico que se debe suministrar al sistema es 3309 cfm, Anexo 18, lo cual es mayor a la demanda calculada con la metodología propuesta, ya que para esta se consideró una temperatura de 8 °C. Por lo tanto se debe cuidar que los compresores elegidos en la metodología propuesta tengan la capacidad de suministrar hasta 3309 cfm al sistema.



**Fig 3.20.** Demanda de aire (cfm) y temperatura ambiental vs horas de trabajo. **Fuente:** Elaboración propia.

Por otra parte, con el gráfico elaborado, se pueden considerar dos acciones. La primera; cuidar que los compresores elegidos para este diseño tengan la capacidad de suministrar el caudal volumétrico necesario para el sistema aun incluso en la temperatura máxima. La segunda, con la finalidad de tener un menor costo de inversión, compra de compresores, elaborar el planeamiento de mina de tal forma que la demanda máxima de aire comprimido no coincida con la hora de temperatura máxima. Es decir, cuidar que el horario de perforación y acarreo no coincida con el horario de temperatura máxima.

## CONCLUSIONES

Esta tesis tiene las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló una nueva metodología de dimensionamiento de redes de suministro de aire comprimido en gran altitud basada en la conservación de la energía y cantidad de movimiento.
- Se desarrollaron casos de estudio aplicando la metodología mejorada.
- Se compararon los resultados de la metodología tradicional con los resultados de la metodología mejorada, mostrando un mejor resultado económico con la metodología mejorada.
- La viabilidad técnica de la implementación de la metodología mejorada es alta ya que los softwares actuales, incluso Excel son capaces de desarrollarla. Solo se debe ingresar el parámetro que se quiere mantener constante en los parámetros de entrada de los softwares, el cual es el flujo másico.
- La viabilidad económica para utilizar la metodología mejorada es alta en proyectos que aún se encuentren en la etapa de diseño. Ya que el ahorro que genera (3.5% – 4.5%) en proyectos que ya están en operación no justifica la implementación que como mínimo debería ser 20%.
- La operación de los equipos, para la metodología tradicional, utiliza el factor de altura, lo cual significa suministrar un mayor caudal de lo necesario a los equipos o, en otras palabras, sobrecargar a los equipos. Esto reduce el tiempo de vida de los mismos y aumenta los costos de mantenimiento.
- Finalmente, gracias a un manejo de datos adecuado, como en la **Fig 3.20**, se puede realizar un planeamiento adecuado y cuidar que los horarios de perforación y acarreo no coincida con las horas de máxima temperatura, para de esta manera el costo de inversión en compresores pueda ser la menor posible.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Realizar un mayor análisis de la efectividad de la metodología propuesta en redes de suministro de aire a baja presión, como es en el caso de sopladores.
- Realizar el análisis de los casos de estudio considerando las caídas de presión por cambio de dirección, forma.
- Realizar pruebas modelo de pequeñas redes de suministro de aire comprimido y de sopladores para corroborar la efectividad de utilizar la metodología propuesta en redes de alta presión en comparación con redes de baja presión.
- Realizar estudios sobre la conservación de energía y cantidad de movimiento en equipos neumáticos que no utilizan motores neumáticos para transformar la energía neumática a energía mecánica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] INEI, «Comportamiento de la Economía Peruana en el Cuarto Trimestre de 2017,» Lima, 2018.
- [2] Minera Andina y Sociedad, «Primer cargador eléctrico para minería subterránea ya opera en el Perú,» Minera Andina Comunicaciones, 2018.
- [3] Rumbo Minero, «Primer cargador eléctrico para minería subterránea ya opera en el Perú,» Rumbo Minero, 2018.
- [4] Ministerio de Energía y Mina, «Producción Minera Diciembre 2017,» Lima, 2018.
- [5] Atlas Copco, «Manual del Aire Comprimido,» Atlas Copco Air power NV, Bélgica, 2011.
- [6] J. A. Lopez Seiko, «Mejoramiento del sistema de aire comprimido para optimizar perforación en operaciones mineras subterráneas en U.E.A. Orcopampa mina Chipmo,» Universidad Nacional del Perú, Huancayo, 2013.
- [7] E. Transmission, «AIR FUNDAMENTALS - TUTORIAL 1,» Everest Transmission, India, 2006.
- [8] Atlas Copco, «Economy,» de *Compressed Air Manual*, Belgium, Atlas Copco Air Power, 2015, pp. 102 - 107.
- [9] F. A. Aedo Quiroz, «Diseño, cálculo y evaluación del sistema de red de aire comprimido en minas subterráneas,» Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2013.
- [10] D. M. Mejía Gomero, «Evaluación del sistema de aire comprimido de un centro minero ubicado a 3500 msnm,» Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2007.
- [11] V. A. Arenas Vera, «Diseño óptimo de la red de distribución de aire comprimido para reducir costos en la zona de Mariana,» Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 2013.

- [12] B. S. Elliott, «The conservation of mass and energy as applied to compressed aie,» de *Compressed air operations Manual*, United States, McGraw-Hill, 2006, p. 95.
- [13] Corporación Nacional de Cobre de Chile (CODELCO), «Metodos y equipos de perforación».
- [14] Trident, Compressed Air LTD., «Trident, Copmressed Air LTD., Compressed Air System Specialists; Oil free ACFM and SCFM altitude Corrections,» [En línea]. Available: <http://trident.on.ca/engineering-information/oil-free-acfm-scfm-altitude-corrections/>. [Último acceso: 28 Mayo 2018].
- [15] Atlas Copco, «Compresores de tornillo rotativos con inyección de aceite,» Atlas Copco, Bélgica, 2010 .
- [16] Eacasa, Energia en Aire Comprimido, «Eacsa, Energía en Aire Comprimido,» [En línea]. Available: <http://energiaenaire.com.mx/por-que-se-cae-la-presion-en-los-sistemas-de-aire-comprimido/>. [Último acceso: 03 Junio 2018].
- [17] CPIF'P Piramide, «PROYECCTO INNOVACIÓN:"EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO",» *Cpif'p Piramide*.
- [18] Kaeser compresores, «Recuperación del calor para aplicaciones de aire y agua caliente,» Kaeser compresores, Zaragoza.
- [19] W. Scales, «Aire Compressor heat recovery is a hot topic,» *Compressor*, 2003.
- [20] I. M. Bragado, *Fisica General*, 2004, pp. 32, 33.
- [21] Conselleria de cultura, educación e ordenación universitaria, «Unidad 2. Energía,» Galicia.
- [22] Caparoman, «Diagrama de control de un motor nuemático con reductor de ruido.,» [En línea]. Available: <http://coparoman.blogspot.com/2014/05/valvulas-distribuidoras-neumaticas-22.html>. [Último acceso: 06 Julio 2018].
- [23] L. M. Conesa, «2005. Internacional de la física. Año Einstein. Historia de la ecuación  $E=mc^2$ ,» *Dialnet*, 2005.

- [24] R. Mott, «El flujo de los fluidos y la ecuación de Bernoulli,» de *Mecánica de Fluidos*, México, Pearson, Prentice Hall, 2006, p. 167.
- [25] R. Mott, «Viscosidad de los Fluidos,» de *Mecánica de Fluidos*, Mexico, Pearson Educación de México, 2006, pp. 26 - 34.
- [26] Universidad de los Andes, «Fundamentos Teóricos: Universidad de los Andes,» [En línea]. Available: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/INST\\_Flujo/fundamentosteoricos.html](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/fundamentosteoricos.html). [Último acceso: 09 Mayo 2018].
- [27] Y. A. Cengel, «Fundamentos de la Convección,» de *Transferencia de calor y masa*, México, Mc Graw Hill, 2011, pp. 373 - 401.
- [28] Mundo Compresor, «Mundo Compresor, portal industrial,» Aire Comprimido, [En línea]. Available: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/>. [Último acceso: 2018 Abril 27].
- [29] Compressed Air and Gas Institute, *Compressed Air and Gas, Handbook*, CAGI, 2016.
- [30] Universidad del Atlántico, «Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido,» Colombia.
- [31] Anónimo, «Construcción de una red de aire comprimido».
- [32] E. C. Royo, *Aire comprimido*, Madrid: Paraninfo, 1994.
- [33] A. I. L. M. M. Carello, «Pressure drop in pipe lines for compressed air: comparison between experimental and theoretical analysis,» Department of Mechanics - Politecnico di Torino, Torino, 1998.
- [34] J. M. Viñas, «Presión y Temperatura,» Meteo, Guadalajara.
- [35] Compressed Air and Gas Institute, «CAGI,» [En línea]. Available: <http://www.cagi.org/education/glossary.aspx>. [Último acceso: 2018 Abril 27].
- [36] Kaeser Compresores, *Designing your compressed air system*, Kaeser Compresores, 2007.

- [37] Atlas Copco, General catalog for compressed air, gas and vacuum solution, Belgium, 2014.
- [38] The Wheater Channel, «The Wheater Channel,» 2018. [En línea]. Available: <https://weather.com/es-PE/tiempo/horario/l/a925b84e4a39174e31a5215be829412fb7cc146d95e3b8a49a11895450ed7689>. [Último acceso: 01 Junio 2018].
- [39] A. E. Menas Salas, «Planeamiento de Minado Subterráneo para Vetas angostas: Caso Practico; mina "Esperanza de Caraveli" de Compañía Minera Titán S.R.L.,» Pontificie Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.
- [40] L. V. R. J. Cedrón J., «Química General,» Pontificie Universidad Católica del Perú, [En línea]. Available: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/521-leyes-de-los-gases-ideales.html>.
- [41] M. A. B. Yunes A. Cengel, «Termodinámica,» de *Termodinámica*, Mexico, Mc Graw Hill, 2009, p. 15.
- [42] R. Chang y W. College, Química, México: McGraw-Hill, 2002.
- [43] Gobierno de Chile, «Con minería se aprende,» Gobierno Nacional de Chile, 12 03 2018. [En línea]. Available: <http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/tipos-de-minerales/>.
- [44] Southern Copper, «Souther Copper,» Glosario de terminos, [En línea]. Available: <http://www.southernperu.com/ESP/opinte/Pages/PGGlosario.aspx#k>.
- [45] Air-man, «Solución-Man, Solución de tuberías de calidad,» [En línea]. Available: <http://www.air-man.com.ar/solucion-de-tuberias-de-calidad.html>. [Último acceso: 19 Junio 2018].
- [46] Parker, «Parker, El riginal sistema de tuberías de aluminio para fluidos industriales.,» [En línea]. Available:

[http://www.parkertransair.com/jahia/webdav/site/transair/shared/Download/pdf/LEG\\_10028\\_BrochureD50\\_ES\\_BD.pdf](http://www.parkertransair.com/jahia/webdav/site/transair/shared/Download/pdf/LEG_10028_BrochureD50_ES_BD.pdf). [Último acceso: 18 Junio 2018].

- [47] Instalaciones Aire Comprimido, «Compresores Basastur,» Compresores Basastur, Instalaciones Aire Comprimido, [En línea]. Available: <http://www.compresoresbasastur.com/instalaciones-aire-comprimido/>. [Último acceso: 19 Junio 2018].
- [48] Atlas Copco, «Oil Injected Rotary Screw Compressors,» Atlas Copco, Belgium, 2016.
- [49] Gardner Denver, «Compresores de Tornillo de Velocidad Variable,» Gardner Denver, Finlandia, 2008.
- [50] Putzmeister, «Putzmeister, El papel del shotcrete en el ciclo de Perforación & Voladura,» [En línea]. Available: <http://bestsupportunderground.com/shotcrete-perforacion-voladura/>. [Último acceso: 29 Abril 2018].
- [51] All Biz, «All Biz, Pala Neumática P-56,» [En línea]. Available: <https://pe.all.biz/pala-neumatica-p-56-g45114>. [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [52] Direct Industry, «Direct Industry,» [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/dux-machinery-corporation/product-59036-421304.html>. [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [53] Seven Trent Water Authority, «Dr. Sauer & Partners,» Sevent Trent Water Authority, [En línea]. Available: <http://projects.dr-sauer.com/taxonomy/term/15?page=1>. [Último acceso: 29 Abril 2018].
- [54] J. M. Gambini, «Civil Gueeks,» [En línea]. Available: <https://civilgeeks.com/2011/10/17/empernado-en-roca-parte-ii/>. [Último acceso: 29 Abril 2018].
- [55] Mine Class, «Mine Class,» [En línea]. Available: <https://mine-class.com/course/mineria-cielo-abierto/>. [Último acceso: 26 Junio 2019].

- [56] Minera Chinalco Perú S.A., «Minera Chinalco Perú S.A.» [En línea]. Available: [www.chinalco.com.pe](http://www.chinalco.com.pe). [Último acceso: 26 Junio 2019].
- [57] C. A. Turñate, «SlideShare,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/diegocaycho63/rock-blasting-1-2-y-3>. [Último acceso: 27 Junio 2019].
- [58] G. A. R. O. Bustamanate Orlando, «Concentración de Minerales,» Univeridad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia, 2008.
- [59] R. A. G. Madrid, «Evaluación por modelación CFD del proceso de flotación en una celda de agitación mecánica y del efecto de la granulometría en la recuperación de mineral,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, 2012.
- [60] Yo minería Jimdo, «Yo minería Chile,» [En línea]. Available: <https://yomineria.jimdo.com/metalurgia-extractiva/concentracion-por-flotacion/>. [Último acceso: 27 Junio 2019].
- [61] I. A. Carreto, «Apuntes Científicos,» Universidad del Valle de México, 2012. [En línea]. Available: <http://apuntescientificos.org/index.html>.
- [62] R. Urquizo, *Ley de las presiones parciales*.
- [63] Hispano, *Ley de Amagat*.
- [64] J. B. Méndez, «Termodinámica, tema 10. El gas ideal.,» Universidad de Sevilla, 2006.
- [65] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, México: Mc Graw Hill, 2011.
- [66] Neumac, «Motores Neumáticos,» España.
- [67] M. A. M. G., «Neumática Industrial para todos,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/neumaticaparatodos/motores-neumaticos>. [Último acceso: 23 Abril 2018].

- [68] «WikiFab,» Cilindros Neumáticos, [En línea]. Available: [http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/index.php/Cilindros\\_Neum%C3%A1ticos](http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/index.php/Cilindros_Neum%C3%A1ticos). [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [69] A. C. Solé, «Neumática e Hidráulica,» 3Q, Marco Bombo, España, 2007.
- [70] Comeval , «Comeval,» Armateur Group, [En línea]. Available: <http://www.comeval.es/formacion-criterios-seleccion-valvulas.html>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [71] «Conceptos básicos de neumática e hidraulica,» [En línea]. Available: [http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica31.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica31.htm). [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [72] Boart Longyear, «Minera Drilling,» [En línea]. Available: <http://www.mineradrilling.com/productos/s250>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [73] Atlas Copco, « Crowder Hydraulic tools,» [En línea]. Available: <https://www.crowderhydraulictools.com/stoper-feed-leg-drills.htm?sso=0>. [Último acceso: 23 Abril 2018].
- [74] A. Copco, «Genuine parts of rock drill,» 2018.
- [75] Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, «Exploradores,» [En línea]. Available: <http://www.exploradores.org.pe/mineria/que-es-la-mineria.html>. [Último acceso: 17 Abril 2018].
- [76] Docencia Formación Empleo, *Condiciones de Seguridad y Salud en obras de construcción. Ejecución de Tunel en mina*, 2012.
- [77] C. d. M. B. S.A.A., «Buenaventura,» [En línea]. Available: <http://www.buenaventura.com/es/operaciones/detalle/2>.
- [78] C. L. Jimeno, «Diseño de voladuras en túneles y galerías,» de *Second Meeting, Perú, Tunnel & Mining Under, Ground Conditions.*, Perú, 2016.

- [79] Flownex, «Flownex, Simulation Enviroment,» [En línea]. Available: <https://www.flownex.com/>. [Último acceso: 03 Mayo 2018].
- [80] Flownex, «Flownex Introduction,» 2015.
- [81] B. Teixeira, «Flownex: Una Manera Fácil y Rápida de Simular y Optimizar el Diseño de Sistemas Fluidos,» Brasil, 2018.
- [82] Flownex SE, «Background to Flownex,» 2016.
- [83] Flownex, «General User Manual,» South Africa, 2017.
- [84] Ministerio de Energía y Minas, «Modificación del "EIA del Depósito de Relaves 4A y 5 e Incremento de Capacidad de la Planta a 4000 TMSD",» Lima, 2016.
- [85] Plant Services, «Plant Services, Compress Efficiently,» Putman Media, [En línea]. Available: <https://www.plantservices.com/articles/2008/096/>. [Último acceso: 2018 Mayo 31].

# ANEXOS

## Anexo 1. Glosario de Términos

**Gas ideal:** Aquel gas cuyas moléculas están lo suficientemente alejadas para que el comportamiento de una no afecte a la otra [40].

**Aire:** El aire es una mezcla de gases, compuesta principalmente por oxígeno (21%) y nitrógeno (78%). El aire se trata como un gas ideal debido a que el oxígeno y el nitrógeno se comportan como gases ideales a condiciones ambientales [41].

**Aire comprimido:** Determinada masa de aire que se encuentra a una presión mayor a la atmosférica [28].

**Pie cúbico por minuto estándar (scfm por sus siglas en inglés):** Caudal de aire a condiciones estándar de un equipo o sistema neumático para operar en su potencia nominal ( $T_{std}= 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{std}=14.5\text{ psia}$ ;  $\phi= 0\%$ ) [35].

**Pie cúbico por minuto real (acfm por sus siglas en inglés):** Caudal de aire a ciertas condiciones que requiere un equipo o sistema neumático para operar en condiciones ambientales reales [35].

**Aire Húmedo:** Mezcla de aire seco con vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que puede contener el aire varía con la temperatura a la que se encuentra [35].

**Punto de Rocío:** Temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire [35].

**Humedad Absoluta:** Es una medida de cuanta masa de agua existe en una unidad de masa de aire seco [35].

**Humedad Relativa ( $\phi$ ):** Es una relación de cuanto vapor de agua existe en la unidad de aire seco respecto al máximo vapor de agua que puede contener el aire en esas condiciones [35].

**Aire seco:** Aire con 0% de humedad relativa [35].

**Aire saturado:** Aire con 100% de humedad relativa [35].

**Temperatura:** Medida de la energía cinética en las moléculas (energía interna). Existen cuatro unidades de medida más conocidas: Grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ), Grado Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), Grado Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) y Grado Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ ) [41].

**Masa:** Magnitud de materia que existe en un cuerpo [42].

**Volumen:** Espacio que ocupa un cuerpo en el espacio [42].

**Densidad:** Relación masa volumen de un cuerpo, solido, liquido o gas [42].

**Presión Ambiental:** Es el peso de las columnas de masa de aire sobre la superficie terrestre. A mayor altura, menor columna de aire, es decir, menor presión [35].

**Presión Manométrica:** Es la presión que ejerce una fuerza sobre una superficie, tomando como presión cero la presión ambiental [35].

**Presión Absoluta:** Es la suma de la presión ambiental y presión manométrica.

**Mineral:** Un mineral es una sustancia sólida e inorgánica cuya estructura es ordenada y se encuentra en la superficie o en las diferentes capas de la tierra. Su formación es en miles de años [43].

**Ley:** El porcentaje de contenido metálico en el mineral [44].

## **Anexo 2. Marco Teórico**

### **7.1. Material de las tuberías de distribución**

En régimen laminar, la caída de presión no depende de la rugosidad de la tubería por la que circula, mientras que en régimen turbulento sí. En consecuencia, la rugosidad de la tubería tendrá gran efecto sobre la caída de presión si se presenta un régimen turbulento. Por ello el último de los avances tecnológicos en cuanto a materiales para tuberías de distribución, halló que el aluminio es el material más indicado para esta aplicación. Entre algunas ventajas tiene menor rugosidad, menor peso, mayor facilidad para manufacturar debido a su maleabilidad [45] [46].

#### **7.1.1. Aluminio**

Considerando el efecto de la rugosidad sobre la eficiencia en la distribución de aire comprimido, se empezó a dejar de lado las tuberías de acero y se están implementando tuberías de aluminio en las redes de distribución ya que además de tener una muy baja rugosidad, presenta otras ventajas sobre el acero [46].

Entre las ventajas más claras tenemos que el aluminio no se corroe con la humedad del aire comprimido, a diferencia de las tuberías de acero. Esta diferencia tiene un gran impacto con el tiempo. Ya que la oxidación de las tuberías de acero formaba grumos dentro de la tubería lo cual provocaba que el flujo tenga perturbaciones en su recorrido y presente mayores caídas de presión. En consecuencia, las tuberías de aluminio permiten un caudal máximo 20% mayor [46].

Por otro lado, el aluminio es más ligero lo cual permite reducir la cantidad de personas necesarias y el tiempo de instalación, lo cual tiene como consecuencia menores costos [45].

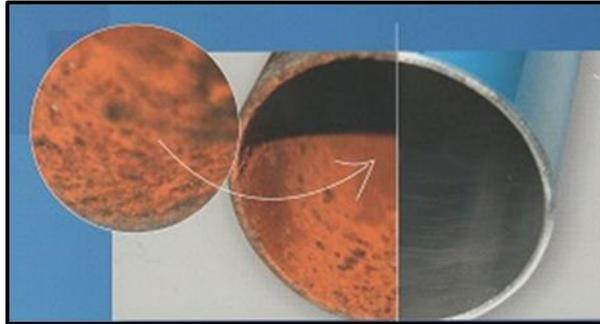


Fig 7.1 Comparación entre una tubería de acero y una tubería de aluminio después de su uso.  
Fuente: Compresores Basastur, Instalaciones de aire comprimido [47].

### 7.1.1. Acero Inoxidable

A pesar de ser la mejor opción contra la corrosión, resulta poco económico. Pueden requerir uniones soldadas (posible hasta 8 pulgadas de diámetro), además de personal altamente calificado. No es una opción para el aire comprimido, por ello, la cantidad de piezas en este material es limitada.

## 7.2. Sistemas de control y regulación del compresor

### 7.2.1. Todo/ Nada

La técnica más básica para el funcionamiento de un compresor frente a carga variable es encender (carga) el motor eléctrico cuando la presión alcanza el límite inferior de trabajo y apagar (descarga) el motor cuando la presión alcanza el límite superior. Sin embargo, esta técnica es recomendable solo para compresores con potencia menor a 10 hp [5] ya que resulta poco económico debido a que se mantiene encendiendo y apagando el compresor, lo cual reduce el tiempo de vida y aumenta los costos de mantenimiento.

Para aplicar esta técnica se debe trabajar un amplio rango de variación de presiones, que generalmente varía entre 0.3 y 1 bar.

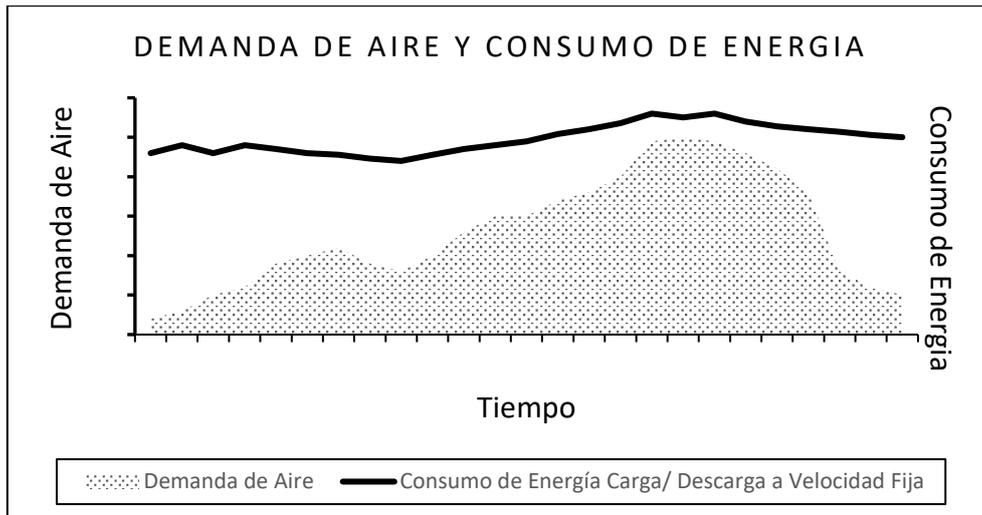


Fig 7.2 Demanda de Aire y Consumo de energía respecto al tiempo utilizando técnica todo/ nada.  
Fuente: Oil Injected Rotary Screw Compressors. Atlas Copco [48]

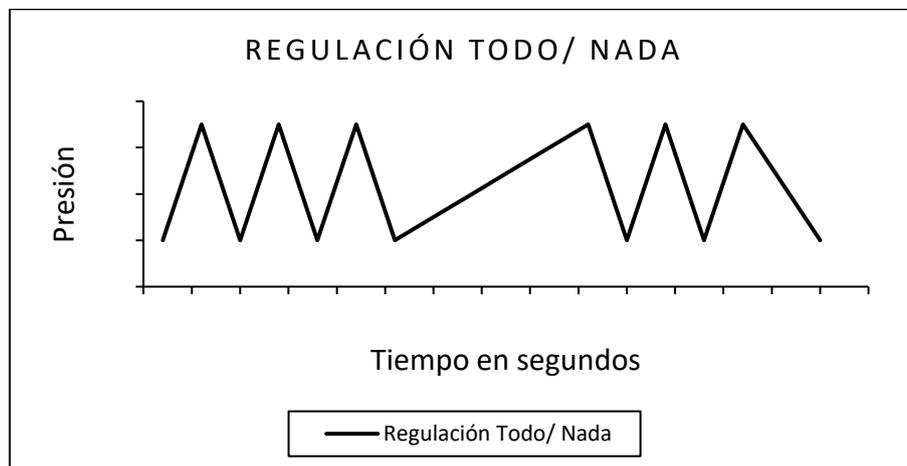


Fig 7.3 Regulación de presión con técnica Todo/Nada.  
Fuente: Manual del Aire Comprimido, Atlas Copco, 2011 [5].

### 7.2.2. Variadores de Velocidad

En el ciclo de vida de los compresores, más del 80% de los costos se debe al consumo de energía [48]. Por lo que resulta indispensable hacer todo tipo de ahorro de energía como sea posible. El accionamiento de velocidad variable, VSD por sus siglas en inglés, es una tecnología que mide que la presión del sistema se mantenga en un rango de trabajo modificando la velocidad del tornillo.

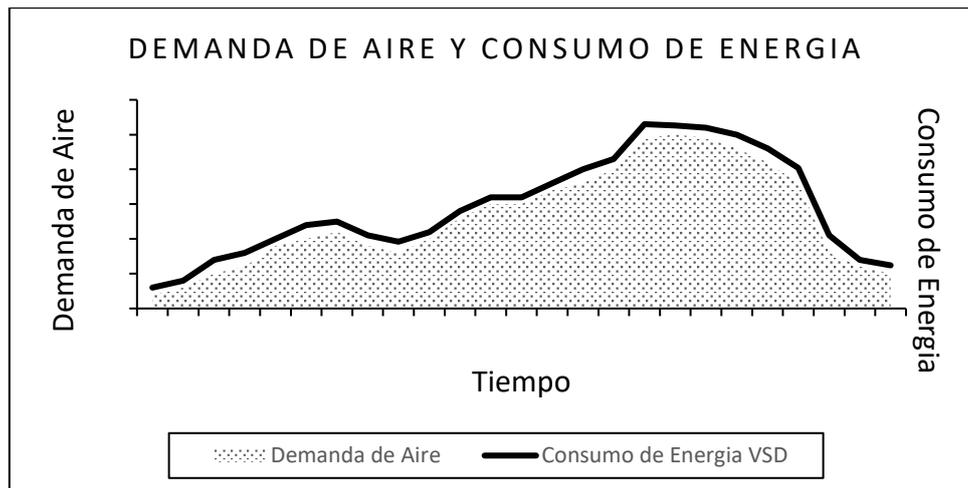


Fig 7.4 Demanda de Aire y Consumo de Energía respecto al tiempo utilizando variadores de velocidad.  
Fuente: Oil Injected Rotary Screw Compressors. Atlas Copco [48].

Los beneficios de esta tecnología son notorios, se puede llegar a ahorrar hasta un 40% de los costos de energía y hasta un 30% de ahorro en los costos de ciclo de vida [49], ya que reduce la cantidad de arranques lo cual beneficia al periodo de vida útil del compresor.

### 7.3. Minería Subterránea

La minería subterránea consiste en la extracción de minerales mediante túneles que llegan a niveles de 1000 metros bajo la superficie. Para la extracción de los minerales se debe sondear las zonas e identificar la ubicación y ley de los minerales [43].

### 7.4. Operaciones en Minería Subterránea

En minería subterránea se sigue un mismo ciclo de operaciones para realizar los túneles, seguir las vetas con mineral y explotar el mineral. Este es el ciclo de perforación y voladura para túneles, el cual se muestra gráficamente en la **Fig 7.5**.



Fig 7.5 Ciclo de operaciones para realizar túneles en minería subterránea.  
Fuente: Putzmeister, El papel del shotcrete en el ciclo de Perforación & Voladura [50]

#### 7.4.1. Perforación

Existen dos tipos de perforación en mina según la maquinaria: Mecanizada y Manual.

La perforación mecanizada emplea equipos de grandes dimensiones como son los jumbos. Estos equipos se pueden utilizar únicamente si se dispone de espacio suficiente para maniobrarlos en los túneles.

La perforación manual emplea los equipos Jack leg y Stoper. Estos equipos se emplean cuando no se dispone de espacio suficiente para maniobrar los jumbos [50].

#### 7.4.2. Carga explosiva explosivo

Los explosivos son cargados con cartucho o en granel. La carga de explosivos en forma de emulsión se realiza a través de bombeo por manguera.

Actualmente se tiene equipos automatizados para esta tarea ya que reduce el riesgo de accidentes hacia los trabajadores de la mina. Existen equipos que se encargan de esta

labor tanto en forma horizontal como vertical, además de asegurar un mejor llenado del explosivo [50].

#### 7.4.3. **Voladura**

Una vez listos los explosivos se continúa la voladura. Esta se da a cabo de manera secuencial para asegurar una mejor fragmentación del mineral, además de no dañar estructuras cercanas a causa de las vibraciones [50].

#### 7.4.4. **Ventilación**

Como consecuencia de la voladura muchos gases y polvo se liberan y se mantienen en el ambiente. Muchos de estos gases son tóxicos y si su concentración en el ambiente, pueden causar hasta la muerte. Es por ello que la evacuación de estos gases resulta muy importante. [50]

#### 7.4.5. **Desescombros**

Una vez expulsados los gases, el personal puede ingresar al túnel para acondicionarlo y seguir con las operaciones.

El primer paso es el desescombros. Esta actividad se puede dar de dos formas y depende de las dimensiones del túnel: el desescombros mecánico y el desescombros manual. El desescombros mecánico se da con equipos de motor diésel y se llevan los escombros hasta la superficie. Mientras que el desescombros manual utiliza equipos neumáticos (ver **Fig 7.6**), para luego colocar los escombros en unos baldes y se transporten a la superficie utilizando un winche [50].



Fig 7.6 Pala Neumática  
Fuente: All biz, pala neumática [51]

#### 7.4.6. Saneamiento

Luego del desescombro se procede a remover las rocas que pudieron haber quedado colgando en el techo del túnel. Se pica las rocas con los equipos destinados para esta tarea. Existen dos tipos de saneo: mecánico y manual. El saneo mecánico se realiza con máquinas y se da en túneles donde hay espacio suficiente para maniobrar los equipos (ver **Fig 7.7**). El purgado manual lo realizan los trabajadores con máquinas acondicionadas para este trabajo. Sin embargo, es de gran riesgo ya que existe el peligro de que las rocas caigan sobre el trabajador [50].



Fig 7.7 Máquina de purgado mecánico de túneles para mina.  
Fuente: Dux, Máquina de purgado mecánico (Direct Industry, 2018) [52].

#### 7.4.7. Shotcrete

Para reforzar la estructura del túnel, todo el perímetro de este se baña con hormigón. Este paso también se suele llamar shotcrete. Además, en función a la estructura del terreno se puede necesitar un sostenimiento pesado o un sostenimiento ligero [50].

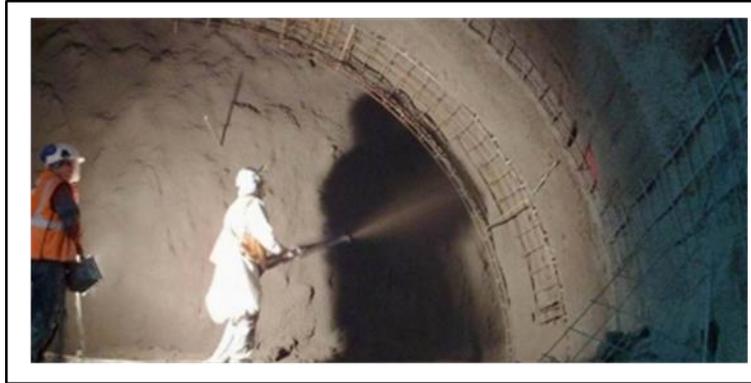


Fig 7.8 Lanzamiento de shotcrete  
Fuente: Hard Rock, Shotcreting (Dr. Sauer & Partners) [53].

#### 7.4.8. Empernado

Una vez solidificado el hormigón, se procede a la instalación de los pernos de anclaje para reforzar el sostenimiento del túnel de acuerdo con el mallado proyectado que depende exclusivamente del comportamiento geo mecánico. Se suele utilizar el shotcrete para proteger a los pernos contra la corrosión [50].

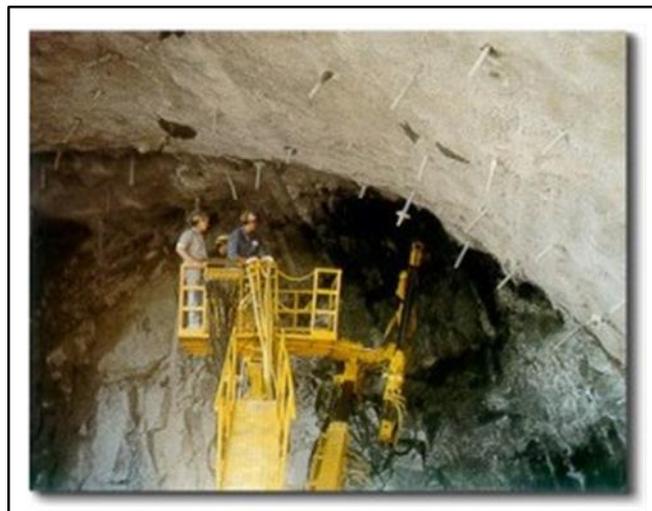


Fig 7.9 Empernado en túnel.  
Fuente: Empernado en roca (Civil Gueeks) [54].

### 7.5. Minería a Tajo Abierto

Se conoce como minería a cielo abierto o a tajo abierto a aquellas operaciones mineras que se desarrollan en la superficie mediante excavaciones y voladura [55].



Fig 7.10. Mina a tajo abierto.  
Fuente: Minera Chinalco Perú S.A. [56]

### 7.6. Operaciones en Minería Superficial

En minería superficial se sigue un ciclo análogo al de minería subterránea. Este ciclo se puede apreciar en la Fig 7.11. No hace falta entrar a mayor detalle ya que muchos de los pasos están incluidos al igual que en el ciclo de operaciones de operaciones mineras subterráneas.

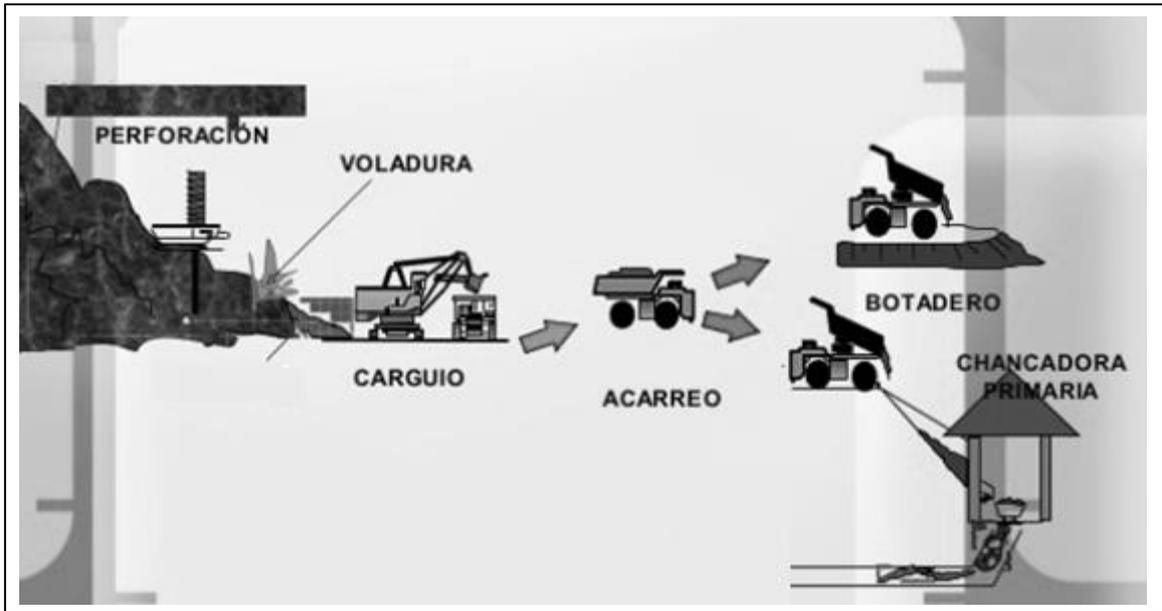


Fig 7.11. Ciclo de operaciones en minería a tajo abierto. Fuente: Rock Blasting, Universidad Nacional de Ingeniería, Dr. Carlos Agreda Turñate [57]

## 7.7. Planta Concentradora de Minerales

Luego de extraer los minerales de los yacimientos, vetas, skarm, etc; y que hayan pasado por las etapas de trituración y molienda viene la etapa de concentración la cual es muy diversa dependiendo del tipo de mineral que se quiera concentrar. La etapa de concentración tiene como finalidad aumentar el porcentaje de presencia del mineral en el flujo más conocido como concentrado [58].

Existen diversos métodos de concentración de minerales, los cuales dependen esencialmente del tipo de mineral que se quiera concentrar. Entre algunos métodos de concentración se tienen: Lixiviación, Flotación, Gravitacional, Concentración eléctrica, Floculación [58]. El caso que se estudia en este documento, es la concentración por celdas de flotación.

### 7.7.1. Celdas de Flotación

Las celdas de flotación son tanques en los que ingresa la pulpa, es decir mineral con gana y fluido líquido, fluido de aire y con ayuda de un mecanismo se produce agitación para dispersar las burbujas de aire y tengan una dosificación uniforme radial.

Previamente al ingreso de la pulpa a la celda, esta es acondicionada con químicos que aumentan la propiedad hidrofóbica del mineral [59]. Esto causa que las partículas de mineral se adhieran a las burbujas de aire y que con ellas floten hasta la superficie de la celda. Ya en la superficie todas las burbujas rebasan y se vierten en la canaleta de concentrado. Para el éxito de esta propiedad hidrofóbica del mineral intervienen diversos parámetros, entre otros el flujo y presión del aire comprimido [59].

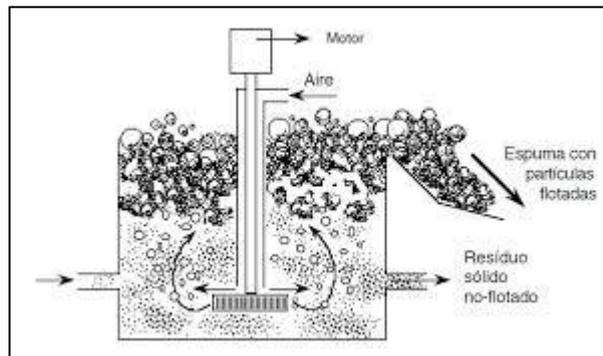


Fig 7.12. Celda de flotación mecánica.

Fuente: Concentración por flotación, Yo minería [60]

## 7.8. Leyes de los Gases

### 7.8.1. Ley de Boyle-Mariote

Esta ley dice que si la temperatura es constante (proceso isotérmico), entonces el producto de la presión y el volumen también será constante [40].

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (20)$$

Donde:

P=Presión absoluta (Pa)

V= Volumen ( $m^3$ )

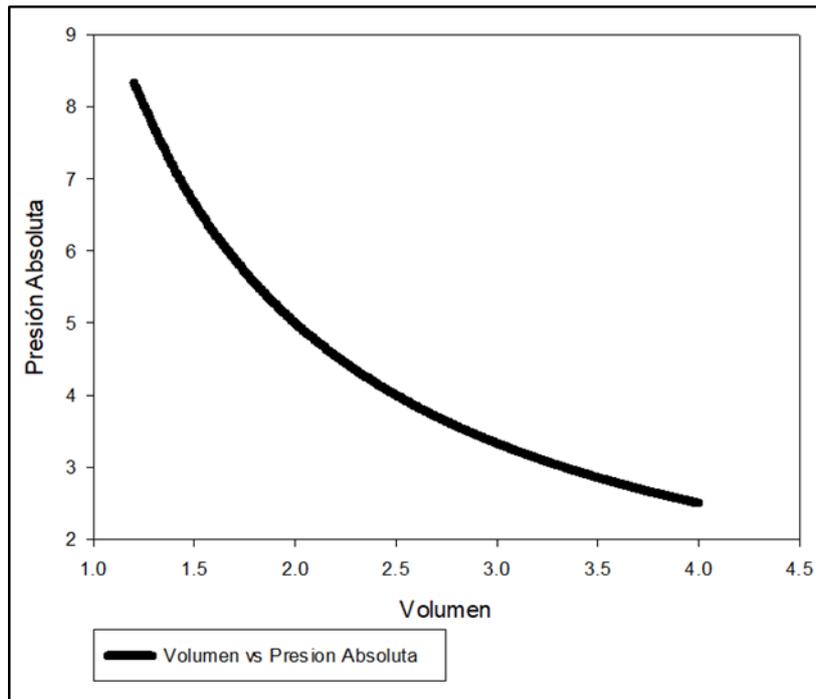


Fig 7.13 Gráfica de la Ley de Boyle. Presión vs Volumen a Temperatura constante.  
Fuente: Elaboración propia, utilizando SigmaPlot 12.0.

### 7.8.2. Ley de Charles y Gay Lussac

Esta ley establece que si la presión es constante (proceso isobárico), entonces la razón volumen temperatura será constante [40].

#### *Ecuación 21. Ley de Charles y Gay Lussac*

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Donde:

V= Volumen ( $m^3$ )

T= Temperatura ( $^{\circ}K$ )

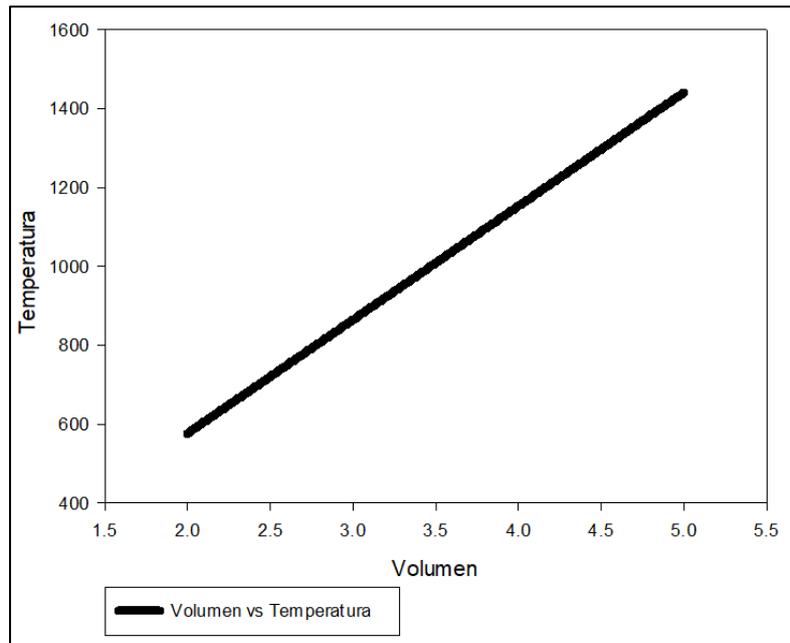


Fig 7.14 Gráfica de la Ley de Charles y Gay Lussa. Temperatura vs Volumen a Presión constante.  
Fuente: Elaboración propia, utilizando SigmaPlot 12.0.

### 7.8.3. Ley de Amonton

Esta ley establece que si el volumen es constante (isocórico) y el número de moles también, entonces la razón presión temperatura será constante [61].

#### *Ecuación 22. Ley de Amonton*

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Donde:

P=Presión Absoluta (Pa)

T= Temperatura (°K)

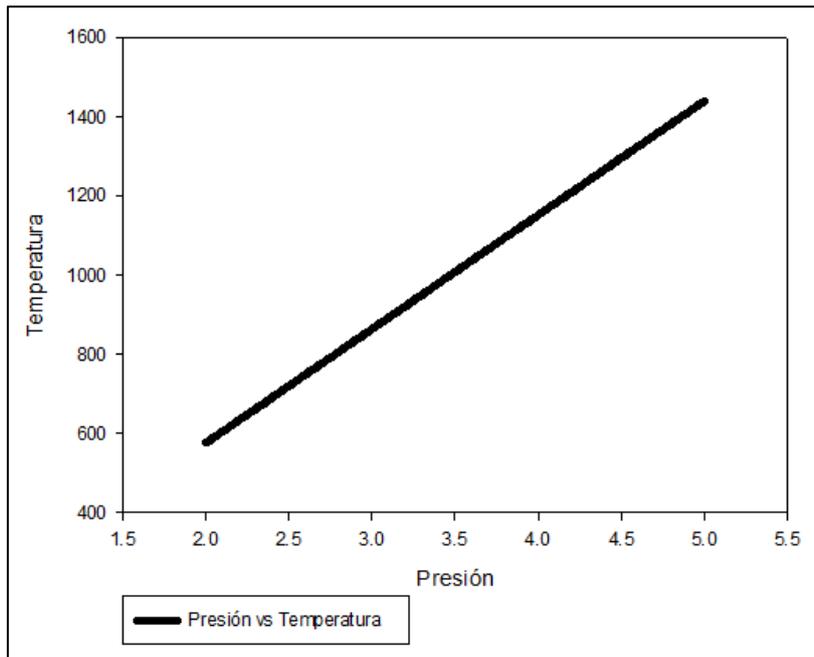


Fig 7.15 Gráfica de la Ley de Amonton. Presión vs Temperatura a volumen constante.  
Fuente: Elaboración propia, utilizando SigmaPlot 12.0.

#### 7.8.4. Ley de Dalton

La ley de Dalton estudia el comportamiento de los gases cuando están en una mezcla. Esta ley dice que si los gases no tienen reacción química cuando están en contacto entre sí, dentro de un recipiente (mezcla de gases), entonces la suma de presiones parciales, de cada gas, es igual a la presión total de la mezcla dentro del recipiente. Las presiones parciales se miden cuando solo hay un gas dentro del recipiente. La relación entre la presión parcial y la presión total es igual a la fracción molar del gas [61], como se aprecia en la **Fig 7.16**.

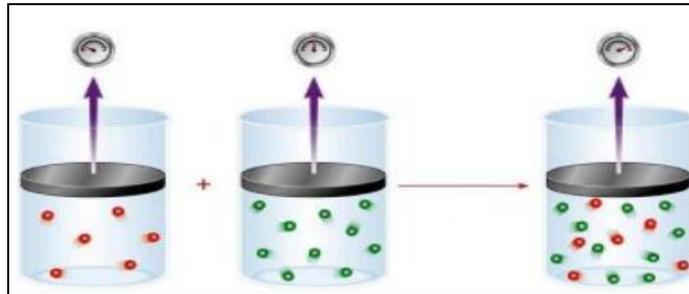


Fig 7.16 Representación de la Ley de Dalton. La presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales.

Fuente: Ley de las presiones parciales. Electricidad [62].

La ley de Dalton se expresa con la siguiente ecuación:

#### *Ecuación 23. Ley de Dalton*

$$P_1 + P_2 = P_T$$

#### 7.8.5. Ley de Amagat

Esta ley establece que, si se tienen diferentes gases a una misma presión y temperatura, entonces al juntarlos en una mezcla el volumen total será la suma de volúmenes que ocupada cada gas (volúmenes parciales) [61].

La relación entre el volumen que ocupada un gas y el volumen total es igual a la fracción molar del gas, como se puede apreciar en la **Fig 7.17**.

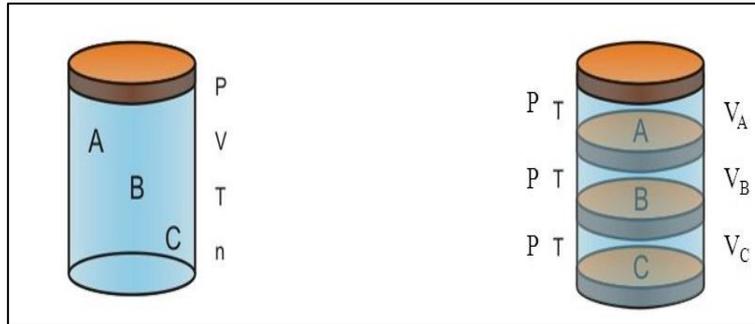


Fig 7.17 Representación de la Ley de Amagat. El volumen total de una mezcla de gases es la suma de los volúmenes parciales.

Fuente: Ley de Amagat, volúmenes parciales. Unidades de medida [63]

***Ecuación 24. Ley de Amagat***

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

**7.8.6. Ley de los Cambios Triples**

Al combinar la ley de Charles con la ley de Boyle se obtiene la siguiente expresión

[40]:

***Ecuación 25. Ley de los cambios triples***

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Esta expresión puede ser utilizada para analizar gases en sistemas cerrados, como: tanques, sistema de refrigeración, etc.

**7.8.7. Ley de Avogadro**

Esta ley dice que, si se tiene temperatura y presión constante, entonces la relación volumen y número de moles será constante. Con lo que se tiene [61]:

***Ecuación 26. Ley de Avogadro***

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$$

También se puede expresar en función de la presión absoluta si se mantiene el volumen y temperatura constante [61]:

***Ecuación 27. Ley de Avogadro***

$$\frac{P_1}{n_1} = \frac{P_2}{n_2}$$

**7.8.8. Ley de Poisson**

Esta ley establece que, si no existe intercambio de calor entre el medio y el proceso en estudio (proceso adiabático), entonces la relación presión absoluta y volumen se expresa [64]:

***Ecuación 28. Ley de Poisson***

$$P_1 * V_1^k = P_2 * V_2^k$$

Donde:

$K = C_p / C_v$  Factor de los procesos adiabáticos

K= 1.66 para un gas monoatómico

K= 1.4, para un gas diatómico

K= 1.3, para gases poliatómicos

**7.8.9. Ley ecuación de Clapeyron**

Juntando las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación general de los gases ideales [40]:

***Ecuación 29. Ley de ecuación de Clapeyron***

$$P * V = n * R * T$$

Donde:

R= Constante universal de los gases ideales

n= número de moles

P= Presión absoluta

## 7.9. Procesos Termodinámicos

### 7.9.1. Proceso Isotérmico:

Proceso en el que se comprime un gas a temperatura constante. Es decir, el trabajo que se ejerce sobre el gas debe eliminarse en forma de calor. Por lo tanto, la energía interna permanece invariable [41].

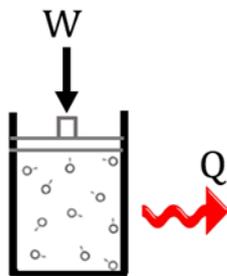


Fig 7.18 Representación de un sistema isotérmico. La energía ganada con el trabajo de una fuerza se disipa en forma de calor.

Fuente: Elaboración propia

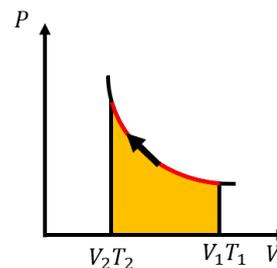


Fig 7.19 Diagrama Presión vs Volumen de un proceso isotérmico.

Fuente: Elaboración propia

### *Ecuación 30. Primera Ley de la Termodinámica*

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$$

A temperatura constante, la energía interna permanece invariable, por lo que se tiene la siguiente expresión:

### *Ecuación 31. Proceso Isotérmico*

$$\Delta Q = -\Delta W$$

### 7.9.2. Proceso Isobárico

Proceso en el que se cambia de estado manteniendo la presión constante. Es decir, cambia el volumen y la temperatura [41].

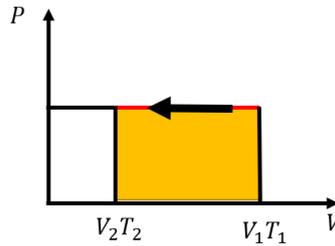


Fig 7.20 Representación de un proceso isobárico en el diagrama presión vs volumen.  
Fuente: Elaboración propia.

### 7.9.3. Proceso Isocórico

Proceso en el que se cambia de estado manteniendo el volumen constante. Es decir, cambia la presión y la temperatura [41].

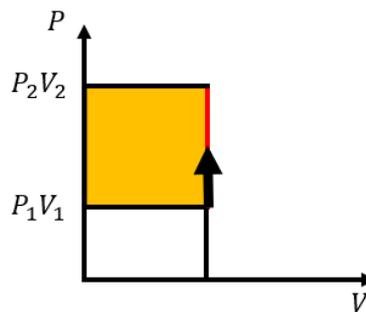


Fig 7.21 Representación gráfica de un proceso isocórico en el diagrama presión vs volumen.  
Fuente: Elaboración propia

### 7.9.4. Proceso Adiabático

También llamado proceso isoentrópico. Proceso en el que no existe intercambio de calor con el entorno. La variación de energía interna se debe a una fuerza externa ejercida sobre el medio. El proceso tiene característica reversible [41].

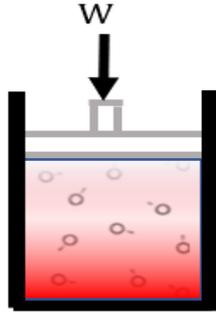


Fig 7.22 Representación de un proceso adiabático. Aumento de presión sin intercambio de calor con el entorno.

Fuente: Elaboración propia.

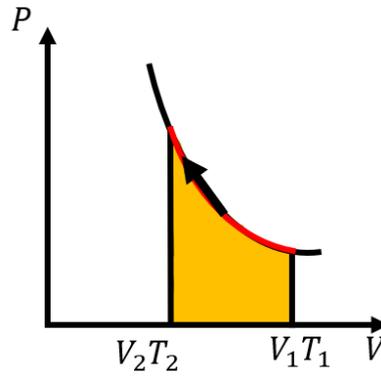


Fig 7.23 Representación de un proceso adiabático. Diagrama presión volumen.

Fuente: Elaboración propia.

### 7.9.5. Proceso Cuasiestático

Proceso en el que a lo largo del desarrollo el sistema permanece muy cerca de su estado de equilibrio, de modo que las propiedades de cualquier parte del sistema no sean diferentes a otra parte del mismo. Este es un caso idealizado y no corresponde a una representación real de un proceso [41].

## 7.10. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el flujo de energía, en forma de calor, de un cuerpo con cierta temperatura hacia otro cuerpo con menor temperatura, este proceso es conocido como la segunda ley de la termodinámica [65]. Existen tres formas de transferir calor en los cuerpos: conducción, convección y radiación.

### 7.10.1. Conducción

La conducción de calor tiene lugar en un mismo cuerpo con diferentes temperaturas en dos de sus superficies. Las partículas con mayor energía, (mayor temperatura), transfieren el calor hacia las adyacentes hasta llegar a las de menos energía. Esta forma de transferencia de calor se puede realizar en sólidos, líquidos o gases [65]. Obedece la función de la Ecuación 32.

**Ecuación 32. Ley de Fourier de la Conducción de Calor**

$$\dot{Q} = -k \cdot A \frac{dT}{dx}$$

Donde:

$\dot{Q}$  = Razón de conducción de calor (W)

$k$  = Conductividad térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$A$  = Area trasnversal al flujo de calor ( $m^2$ )

$dT$  = diferencial de temperatura ( $^\circ K$ )

$dx$  = diferencial de longitud (m)

**7.10.2. Convección**

La convección de calor tiene lugar entre una superficie y un fluido en movimiento. A medida que la velocidad del fluido aumente, también aumentará la transferencia de calor por convección. Si el fluido no está en movimiento, entonces la transferencia de calor es únicamente por conducción [65]. La transferencia de calor por convección obedece la Ecuación 33.

**Ecuación 33. Ley de Newton del enfriamiento**

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)$$

Donde:

$\dot{Q}_{conv}$  = Calor transferido por convección (W)

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$A_s$  = Area Superficial por donde se realiza la convección ( $m^2$ )

$T_s$  = Temperatura de la superficie ( $^\circ C$ )

$T_\infty$  = Temperatura suficientemente alejada de la superficie ( $^\circ C$ )

### 7.11. **Flujo Incompresible**

Habitualmente se considera que el flujo de gases se considera incompresibles si el cambio de densidad que experimente en una tubería o recipiente es menor a 5%. Lo cual se cumple si su velocidad es menor a 100 m/s.

De forma más exacta, se denota que el aire comprimido se puede tratar como flujo incompresible si:

$$Ma < 0.3 \quad (34)$$

Donde el número de mach (Ma) se define como la razón de la velocidad a la que fluye el aire respecto a la velocidad del sonido ( $V_{sonido} = 346 \text{ m/s}$ ) [27]

### 7.12. **Compresores**

Los compresores son equipos neumáticos que funcionan con energía eléctrica y la transmiten al fluido, que en este caso es aire (se considera gas ideal).

Existen dos tipos de compresores: dinámicas y de desplazamiento positivo [5]. A continuación, se explica el funcionamiento de cada uno de ellos.

#### 7.12.1. **Compresores Dinámicos**

En este tipo de compresores el aire comprimido gana energía a través de la velocidad. El compresor hace que el flujo tenga una alta velocidad y al salir del equipo pasa a través de una tobera, la cual provoca que disminuya bruscamente la velocidad del

flujo. Por conservación de energía, en la ecuación de Bernoulli, aumenta la presión estática [5].

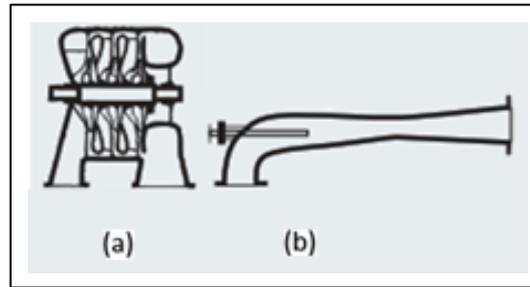


Fig 7.24 Compresores dinámicos. (a) Compresor Radial. (b) Compresor eyector.  
Fuente: Atlas Copco, Manual del Aire comprimido, 2011 [5].

### 7.12.2. Compresores De Desplazamiento Positivo

En este tipo de compresores el aire se almacena en cámaras de compresión. Se reduce el espacio de almacenamiento con lo que se reduce el volumen de aire y aumenta la presión. Con esta nueva presión el aire se envía al sistema [5].

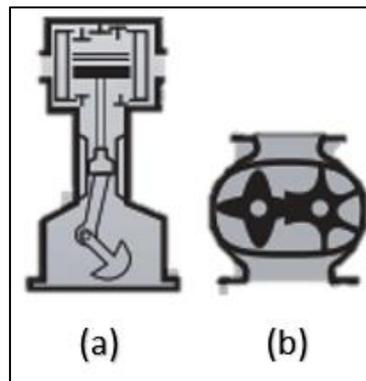


Fig 7.25 Compresores de desplazamiento positivo. (a) Compresor de pistón de simple efecto. (b) Compresor de tornillos.  
Fuente: Atlas Copco, Manual del Aire Comprimido. [5]

### 7.13. Motor Neumático

Un motor neumático es aquel que funciona con la expansión del aire comprimido, transformando la energía del aire comprimido en movimiento mecánico. Existen dos tipos de movimiento con esta energía: Lineal y Rotativo. El más común es el tipo rotativo [66].

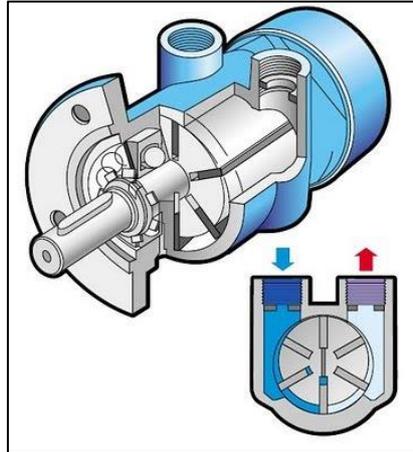


Fig 7.26 Motor neumático de paletas.  
Fuente: Automatización Industrial, Elementos de fuerza [67].

#### 7.14. Cilindro Neumático

El cilindro neumático transforma la energía almacenada en el aire comprimido a movimiento lineal. Existen cilindros de simple efecto, doble efecto y con retorno [68].

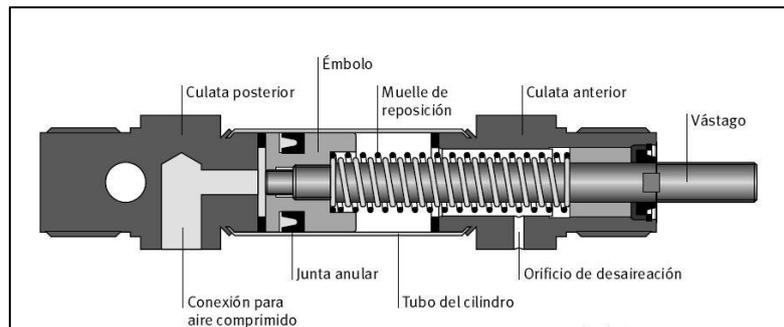


Fig 7.27 Cilindro neumático de simple efecto con retorno.  
Fuente: Cilindros Neumáticos (WikiFab) [68].

#### 7.15. Válvulas

Las válvulas son accesorios o equipos que se utilizan generalmente para aumentar la presión del sistema y balancear el flujo que circula por cada rama del mismo. También se suelen emplear para proteger los equipos neumáticos reduciendo la presión con la que llega el fluido al equipo.

Las válvulas más utilizadas son: válvula distribuidora, válvula antirretorno o de bloqueo, válvula reguladora de presión y válvula de flujo o de velocidad. [69].

Por otra parte, para la selección de válvulas se tiene el tipo de válvulas como primer criterio. Siendo los siguientes tipos de válvulas: aislamiento, retención, regulación y de seguridad [70]

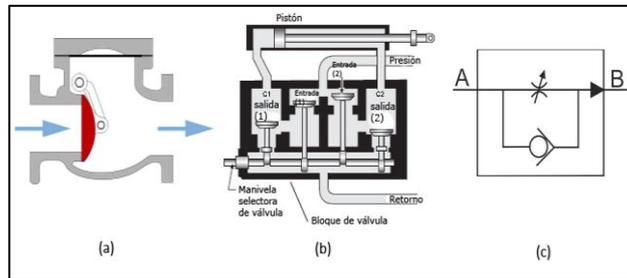


Fig 7.28 Tipos de válvulas. (a) Válvula direccional. (b) Válvula distribuidora. (c) Válvula reguladora de Velocidad. Fuente: Conceptos básicos de neumática e hidráulica [71].

### 7.16. Taladro de Roca, Stoper y Jack Leg

El stoper es un equipo neumático muy usado en minería. Se utiliza para perforaciones en roca de forma vertical. Por otro lado, el Jack Leg cumple la misma función, pero está acondicionado para perforaciones en horizontal [72].



Fig 7.29 Equipo Neumático. Rock drill Stoper. (a) Utilización del equipo en minería subterránea. (b) Rock Drill Stoper.

Fuente: Crowder Hydraulic Tools, Pneumatic stoper and feed leg drills. [73]

Estos equipos tienen dos movimientos: Movimiento lineal (percusión) y movimiento rotativo. El movimiento lineal se lo da un cilindro que es accionado con una válvula de liberación de presión a alta frecuencia. El movimiento giratorio se lo da un motor neumático que hace un eje con engranajes.



Fig 7.30 Mecanismo de funcionamiento de un stoper.  
Fuente: Video de partes de Jack Leg de Atlas Copco [74].

### 7.17. Propiedades del aire a diferentes condiciones

Las propiedades del aire se obtuvieron del programa “*Engineering Equation Solver*”.

Para ello se ingresó a la sección de información de funciones, Fig 7.31, se dio clic en propiedades de fluidos., escogimos air\_ha y luego la viscosidad como la propiedad a calcular. En la ventana de dialogo se ingresó la función de viscosidad para diferentes presiones y temperaturas, Fig 7.32.

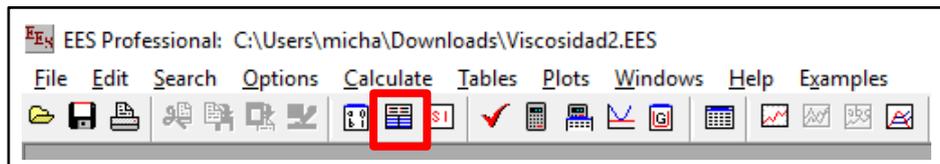


Fig 7.31 Función información de función  
Fuente: Engineering Equation Solver. Software.

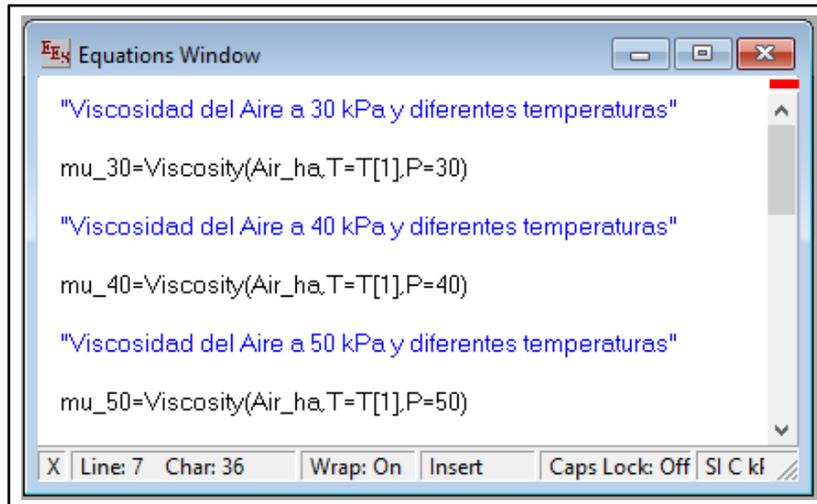


Fig 7.32. Ventana de dialogo  
Fuente: Engineering Equation Solver. Software.

### 7.18. Costos de inversión

Los costos de inversión incluyen los costos de instalación y de compra. Se consideró que el precio unitario de las tuberías de aluminio, incluyendo instalación, sigue la ecuación (35 extrapolada de los valores

Tabla 7.1 Costos de tuberías de aluminio. Fuente: Precios proporcionados por Ing. José Cavassa

<b>Diámetro mm</b>	<b>Costo unitario USD/m</b>
20	51
25	55
30	62
40	75

$$C_{tub} = 0.0145 \cdot x^2 + 0.3455 \cdot x + 38 \quad (35)$$

Donde:

$x$ : Diámetro interno de la tubería (mm)

Además, para los compresores se consideró la (36) extrapolada de los datos:

**Tabla 7.2 Costos de compresor de tornillo.**  
**Fuente: Precios proporcionados por Ing. José Cavassa**

<b>Potencia hp</b>	<b>Costo del compresor USD/hp</b>
5	5400
10	6000
15	7000

$$C_{comp} = 160.x + 4533.3 \quad (36)$$

Donde:

*x*: Potencia en hp del compresor de tornillo

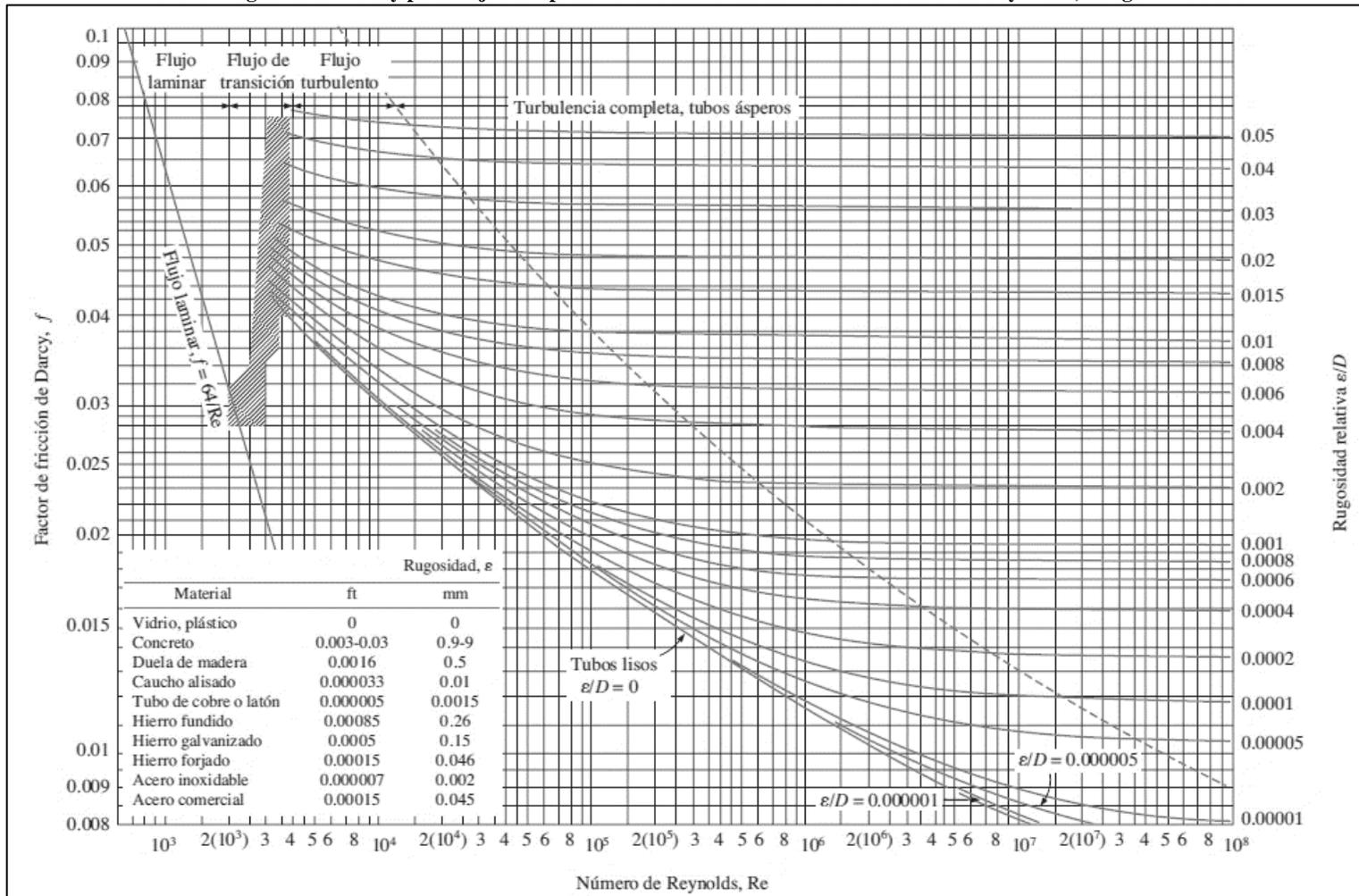
Anexo 3. Producto Bruto Interno Trimestral por Grandes Actividades Económicas: 2007 – 2017

Año / Trimestre	Producto Bruto Interno	Derechos de Importación y Otros Impuestos	Valor Agregado Bruto Total (VAB)	Extractivas			Transformación		Servicios									
				Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	Pesca y acuicultura	Extracción de petróleo, gas, minerales y servicios conexos	Manu-factura	Construcción	Electricidad, gas y agua	Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas	Transporte, almacenamiento, correo y mensajería	Alojamiento y restaurantes	Telecomunicaciones y otros servicios de información	Servicios financieros, seguros y pensiones	Servicios prestados a empresas	Administración pública y defensa	Otros servicios	
<b>2007</b>	<b>319 693</b>	<b>26 503</b>	<b>293 190</b>	<b>19 074</b>	<b>2 364</b>	<b>45 892</b>	<b>52 807</b>	<b>16 317</b>	<b>5 505</b>		<b>32 557</b>	<b>15 885</b>	<b>9 145</b>	<b>8 517</b>	<b>10 279</b>	<b>13 555</b>	<b>13 725</b>	<b>47 592</b>
Trimestre I	74 911	6 346	68 565	4 222	376	10 658	12 009	3 533	1 353		7 351	3 877	2 252	1 997	2 588	3 425	3 296	11 628
Trimestre II	81 059	6 629	74 430	6 493	1 025	11 055	13 678	3 714	1 349		8 018	3 870	2 259	2 074	2 562	3 435	3 225	11 673
Trimestre III	79 962	6 800	73 162	4 262	217	11 893	12 896	4 250	1 359		8 109	4 051	2 345	2 145	2 721	3 335	3 546	12 053
Trimestre IV	83 761	6 728	77 033	4 097	746	12 286	14 224	4 820	1 444		9 059	4 087	2 287	2 301	2 408	3 360	3 656	12 258
<b>2008</b>	<b>348 870</b>	<b>30 079</b>	<b>318 791</b>	<b>20 600</b>	<b>2 435</b>	<b>49 601</b>	<b>57 304</b>	<b>19 071</b>	<b>5 948</b>		<b>36 029</b>	<b>17 517</b>	<b>10 086</b>	<b>9 874</b>	<b>10 941</b>	<b>15 225</b>	<b>14 785</b>	<b>49 477</b>
Trimestre I	82 326	7 287	75 039	4 450	395	11 573	13 583	4 212	1 487		8 050	4 236	2 477	2 374	2 723	3 725	3 518	12 056
Trimestre II	89 602	7 591	82 011	7 025	1 051	12 163	15 145	4 586	1 400		9 174	4 264	2 512	2 384	2 714	3 926	3 419	12 178
Trimestre III	87 670	7 779	79 891	4 715	235	12 696	14 063	5 039	1 498		9 179	4 427	2 599	2 437	2 904	3 815	3 768	12 316
Trimestre IV	89 272	7 422	81 850	4 410	774	13 169	14 513	5 234	1 473		9 646	4 390	2 498	2 379	2 600	3 757	4 080	12 727
<b>2009</b>	<b>352 693</b>	<b>30 169</b>	<b>322 524</b>	<b>20 784</b>	<b>2 321</b>	<b>49 930</b>	<b>53 900</b>	<b>20 359</b>	<b>6 008</b>		<b>35 735</b>	<b>17 153</b>	<b>10 146</b>	<b>10 784</b>	<b>11 850</b>	<b>15 598</b>	<b>17 472</b>	<b>50 862</b>
Trimestre I	84 996	7 643	77 353	4 333	308	12 330	13 109	4 477	1 516		8 100	4 249	2 519	2 785	3 022	3 923	4 113	12 329
Trimestre II	88 818	7 562	81 256	7 026	1 041	12 198	13 557	4 562	1 473		8 647	4 216	2 532	2 662	2 989	4 092	4 066	12 415
Trimestre III	87 944	7 703	80 241	4 750	237	12 696	12 874	5 233	1 467		9 141	4 517	2 558	2 687	3 083	3 788	4 543	12 867
Trimestre IV	90 935	7 461	83 474	4 453	735	12 866	14 080	6 047	1 352		9 847	4 371	2 539	2 450	2 736	3 793	4 730	13 051
<b>2010</b>	<b>382 081</b>	<b>34 667</b>	<b>347 414</b>	<b>21 656</b>	<b>1 675</b>	<b>50 601</b>	<b>59 024</b>	<b>23 765</b>	<b>6 531</b>		<b>39 981</b>	<b>19 419</b>	<b>10 895</b>	<b>11 876</b>	<b>13 015</b>	<b>17 413</b>	<b>18 886</b>	<b>52 677</b>
Trimestre I	90 023	8 191	81 832	4 774	528	12 238	13 578	5 171	1 600		8 854	4 743	2 610	2 906	3 540	4 233	4 569	12 882
Trimestre II	97 227	8 801	88 426	7 278	743	12 694	15 164	5 057	1 613		9 786	4 764	2 721	2 869	3 282	4 544	4 387	12 924
Trimestre III	95 850	8 950	86 900	4 860	280	12 639	14 778	6 034	1 604		10 298	4 895	2 803	3 002	3 419	4 229	4 820	13 259
Trimestre IV	98 981	8 725	90 256	4 744	344	13 010	15 504	6 903	1 714		11 063	5 017	2 735	3 099	2 974	4 407	5 110	13 612
<b>2011</b>	<b>406 256</b>	<b>36 323</b>	<b>369 931</b>	<b>22 317</b>	<b>2 708</b>	<b>50 750</b>	<b>63 943</b>	<b>24 626</b>	<b>7 066</b>		<b>43 434</b>	<b>21 651</b>	<b>12 105</b>	<b>13 243</b>	<b>14 417</b>	<b>19 034</b>	<b>19 691</b>	<b>54 767</b>
Trimestre I	97 016	9 130	87 886	4 896	469	12 379	15 316	5 521	1 729		9 716	5 354	2 918	3 400	3 694	4 680	4 353	13 481
Trimestre II	102 117	8 976	93 141	7 483	1 027	12 333	16 170	5 513	1 745		10 621	5 361	3 006	3 260	3 621	4 998	4 605	13 598
Trimestre III	102 090	9 328	92 762	5 236	542	12 810	16 035	6 147	1 762		11 205	5 437	3 119	3 339	3 815	4 650	5 119	13 746
Trimestre IV	105 033	8 891	96 142	4 802	871	13 228	16 422	7 445	1 830		11 892	5 499	3 060	3 244	3 287	4 706	5 614	14 142
<b>2012</b>	<b>431 199</b>	<b>39 766</b>	<b>391 433</b>	<b>23 944</b>	<b>1 729</b>	<b>51 662</b>	<b>64 758</b>	<b>28 539</b>	<b>7 481</b>		<b>47 103</b>	<b>23 152</b>	<b>13 413</b>	<b>14 835</b>	<b>15 802</b>	<b>20 397</b>	<b>21 288</b>	<b>57 308</b>
Trimestre I	102 967	9 747	93 220	5 132	292	12 571	15 635	6 295	1 856		10 647	5 683	3 261	3 864	3 981	5 100	4 873	14 030
Trimestre II	108 787	9 883	98 904	8 198	760	12 712	16 325	6 507	1 858		11 574	5 719	3 356	3 612	3 959	5 370	4 966	13 988
Trimestre III	108 678	10 117	98 561	5 397	333	13 201	16 302	7 359	1 852		12 157	5 826	3 423	3 644	4 206	4 919	5 465	14 477
Trimestre IV	110 767	10 019	100 748	5 217	344	13 178	16 496	8 378	1 915		12 727	5 924	3 373	3 735	3 656	5 008	5 984	14 813
<b>2013</b>	<b>456 433</b>	<b>42 901</b>	<b>413 534</b>	<b>24 216</b>	<b>2 126</b>	<b>54 304</b>	<b>68 155</b>	<b>31 228</b>	<b>7 754</b>		<b>49 408</b>	<b>24 687</b>	<b>14 523</b>	<b>16 149</b>	<b>17 355</b>	<b>21 880</b>	<b>22 110</b>	<b>59 879</b>
Trimestre I	108 286	10 608	97 678	5 448	337	12 470	16 106	6 983	1 901		11 104	6 078	3 489	4 205	4 369	5 441	5 086	14 601
Trimestre II	116 039	10 865	105 174	8 100	691	13 628	17 376	7 638	1 927		12 153	6 205	3 609	3 935	4 362	5 713	5 184	14 651
Trimestre III	114 346	10 786	103 560	5 341	294	14 003	16 956	7 944	1 922		12 654	6 201	3 642	3 925	4 576	5 315	5 671	15 116
Trimestre IV	117 764	10 642	107 122	5 327	804	14 203	17 715	8 665	1 984		13 497	6 203	3 583	4 084	4 028	5 411	6 169	15 451
<b>2014</b>	<b>467 280</b>	<b>44 087</b>	<b>423 193</b>	<b>24 340</b>	<b>1 515</b>	<b>53 444</b>	<b>67 436</b>	<b>31 789</b>	<b>8 133</b>		<b>50 366</b>	<b>25 292</b>	<b>15 066</b>	<b>17 542</b>	<b>19 555</b>	<b>22 876</b>	<b>23 278</b>	<b>62 361</b>
Trimestre I	113 537	11 081	102 256	5 506	307	13 104	16 760	7 280	2 013		11 398	6 375	3 715	4 535	4 906	5 725	5 372	15 260
Trimestre II	117 978	11 193	106 785	8 107	610	12 926	17 016	7 641	2 026		12 406	6 300	3 816	4 282	4 983	5 963	5 450	15 259
Trimestre III	116 370	10 928	105 442	5 463	264	13 470	16 746	7 894	2 018		12 831	6 272	3 805	4 239	5 190	5 537	5 976	15 737
Trimestre IV	119 595	10 885	108 710	5 464	334	13 944	16 914	8 974	2 076		13 731	6 345	3 730	4 486	4 476	5 651	6 480	16 105
<b>2015</b>	<b>482 473</b>	<b>44 328</b>	<b>438 147</b>	<b>25 294</b>	<b>1 791</b>	<b>57 938</b>	<b>66 831</b>	<b>30 097</b>	<b>8 666</b>		<b>51 916</b>	<b>26 369</b>	<b>15 562</b>	<b>19 138</b>	<b>21 450</b>	<b>23 882</b>	<b>24 118</b>	<b>65 115</b>
Trimestre I	115 580	11 009	104 571	5 570	277	13 615	16 166	8 221	2 121		11 715	6 622	3 834	4 677	5 411	5 996	5 529	15 917
Trimestre II	121 754	11 155	110 599	8 408	828	13 773	17 185	7 040	2 147		12 795	6 576	3 949	4 564	5 444	6 264	5 629	15 997
Trimestre III	119 964	11 085	108 879	5 699	207	14 688	16 355	7 406	2 152		13 255	6 568	3 940	4 636	5 637	5 759	6 177	16 400
Trimestre IV	125 175	11 077	114 098	5 617	479	13 862	17 125	8 830	2 246		14 151	6 603	3 839	4 961	4 938	5 863	6 783	16 801
<b>2016</b>	<b>501 537</b>	<b>45 941</b>	<b>455 596</b>	<b>25 916</b>	<b>1 629</b>	<b>65 234</b>	<b>66 462</b>	<b>29 357</b>	<b>9 332</b>		<b>53 986</b>	<b>27 370</b>	<b>16 001</b>	<b>20 820</b>	<b>22 588</b>	<b>24 483</b>	<b>25 149</b>	<b>67 849</b>
Trimestre I	120 764	11 368	109 396	5 713	282	15 211	15 960	7 021	2 349		12 168	6 904	3 953	5 395	5 876	6 194	5 775	16 595
Trimestre II	126 592	11 493	115 099	8 558	364	16 487	16 245	7 168	2 307		13 226	6 809	4 060	5 083	5 802	6 413	5 879	16 698
Trimestre III	125 228	11 516	113 712	5 822	355	16 568	16 740	7 150	2 298		13 575	6 813	4 054	4 988	5 921	5 904	6 445	17 079
Trimestre IV	128 953	11 564	117 389	5 823	628	16 988	17 517	8 018	2 378		14 417	6 844	3 934	5 354	4 989	5 972	7 030	17 477
<b>2017</b>	<b>514 213</b>	<b>47 880</b>	<b>466 333</b>	<b>26 583</b>	<b>1 705</b>	<b>67 340</b>	<b>69 294</b>	<b>29 989</b>	<b>9 432</b>		<b>53 989</b>	<b>28 174</b>	<b>16 209</b>	<b>22 492</b>	<b>22 850</b>	<b>24 735</b>	<b>26 072</b>	<b>70 449</b>
Trimestre I	123 590	11 842	111 748	5 690	386	15 852	16 321	8 671	2 372									

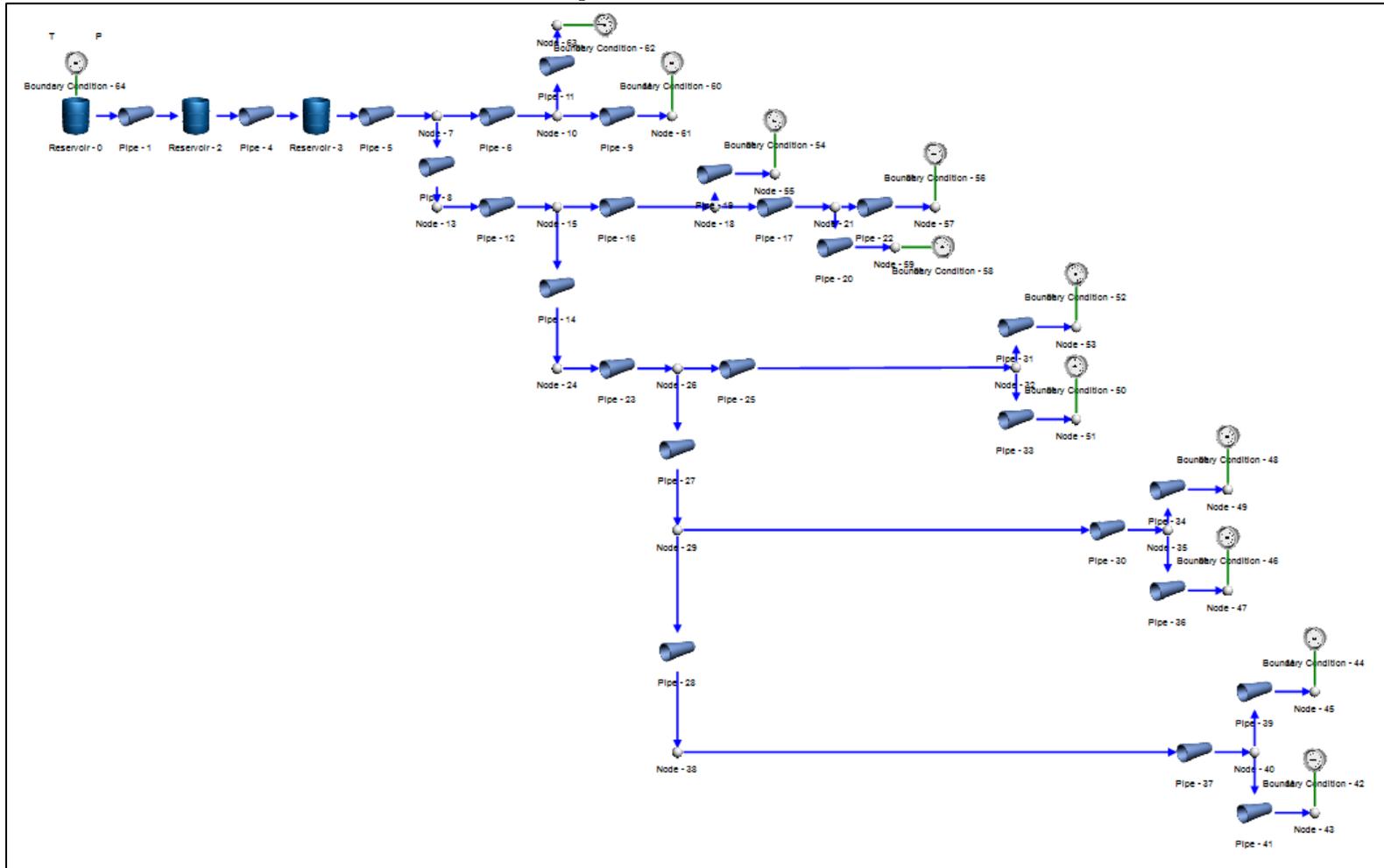
**Anexo 4 Producción Minera Metálica de Oro. 2017/2016- Ministerio de Energía y Minas**

CLASIFICACION	TITULAR	UNIDAD	REGION	TOTAL ACUMULADO ENERO - DICIEMBRE	msnm
RÉGIMEN GENERAL	AC AGREGADOS S.A.	AREQUIPA-M	ANCASH	27,506	
RÉGIMEN GENERAL	MINERA YANACOCHA S.R.L.	CHAUPILOMA SUR	CAJAMARCA	13,712,764	4000
RÉGIMEN GENERAL	MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A.	ACUMULACION ALTO CHICAMA	LA LIBERTAD	12,032,432	4150
RÉGIMEN GENERAL	CONSORCIO MINERO HORIZONTE S.A.	ACUMULACION PARCOY N° 1	LA LIBERTAD	6,791,469	3126
RÉGIMEN GENERAL	MINERA AURIFERA RETAMAS S.A.	RETAMAS	LA LIBERTAD	6,402,036	3126
RÉGIMEN GENERAL	LA ARENA S.A.	ACUMULACION LA ARENA	LA LIBERTAD	5,870,708	3400
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑÍA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	ORCOPAMPA	AREQUIPA	5,815,573	3225
RÉGIMEN GENERAL	GOLD FIELDS LA CIMA S.A.	CAROLINA N°1	CAJAMARCA	5,165,324	3898
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA ARES S.A.C.	ACUMULACION INMACULADA 1	AYACUCHO	5,134,454	4600
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA COIMOLACHE S.A.	ACUMULACION TANTAHUATAY	CAJAMARCA	4,734,850	3884
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY S.A.	ANTAPACCAY 1	CUSCO	4,330,194	3924
RÉGIMEN GENERAL	MINERA LA ZANJA S.R.L.	LA ZANJA	CAJAMARCA	3,987,359	3500
RÉGIMEN GENERAL	MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A.	PIERINA	ANCASH	3,790,103	4200
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA PODEROSA S.A.	LIBERTAD	LA LIBERTAD	3,705,539	3000
RÉGIMEN GENERAL	MINSUR S.A.	FRONTERA UNO	TACNA	3,100,289	4500
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA PODEROSA S.A.	MARIA ANTONIETA	LA LIBERTAD	2,911,410	3000
RÉGIMEN GENERAL	ANABI S.A.C.	VALERIA	APURIMAC	2,830,059	3671
PEQUEÑO PRODUCTOR MINERO	MINERA LAYTARUMA S.A.	LAYTARUMA	AYACUCHO	2,707,894	3,300
RÉGIMEN GENERAL	MINERA VETA DORADA S.A.C.	PLANTA DE BENEFICIO VETA DORADA	AREQUIPA	2,502,001	
RÉGIMEN GENERAL	SHAHUINDO S.A.C.	ACUMULACION SHAHUINDO	CAJAMARCA	2,378,973	2788
PEQUEÑO PRODUCTOR MINERO	COMPAÑIA MINERA LOS ANDES PERU GOLD S.A.C.	ISABELITA	LA LIBERTAD	2,222,328	
RÉGIMEN GENERAL	MINERA YANACOCHA S.R.L.	ACUMULACION CHAQUICOCHA	CAJAMARCA	1,920,567	4000
RÉGIMEN GENERAL	APUMAYO S.A.C.	APURIMAC	AYACUCHO	1,871,966	2817
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	TAMBOMAYO	AREQUIPA	1,769,295	4800
RÉGIMEN GENERAL	ARUNTANI S.A.C.	ACUMULACION ANDRES	PUNO	1,764,316	2985
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA CARAVELI S.A.C.	CHACCHUILLE	AREQUIPA	1,405,069	
PEQUEÑO PRODUCTOR MINERO	MINERA PARAISO S.A.C.	PLANTA DE BENEFICIO MINERA PARAISO	AREQUIPA	1,305,682	4776
RÉGIMEN GENERAL	COMPAÑIA MINERA PODEROSA S.A.	LA PODEROSA DE TRUJILLO	LA LIBERTAD	1,182,233	3000
PEQUEÑO PRODUCTOR MINERO	MINERA YANAQUIHUA S.A.C.	ALPACAY	AREQUIPA	1,181,216	2387
RÉGIMEN GENERAL	CONSORCIO MINERO HORIZONTE S.A.	LOS ZAMBOS	LA LIBERTAD	1,079,974	3126
RÉGIMEN GENERAL	MINERA TITAN DEL PERU S.R.L.	BELEN	AREQUIPA	1,054,172	59

Anexo 5. Diagrama de Moody para flujos completamente desarrollados. Transferencia de Calor y Masa, Cengel 4 Edición.



### Anexo 6. Esquema del modelo de mina en Flownex



**Anexo 7. Resultados de la caída de presión para el primer tramo de la mina modelo a nivel del mar.**

<b>D_nom</b>		<b>D_int</b>		<b>ΔP</b>
in	mm	in	mm	psi
1/8	3.18	0.269	6.8326	2252434.472
1/4	6.35	0.364	9.2456	496485.589
3/8	9.53	0.493	12.5222	108937.892
1/2	12.70	0.622	15.7988	34077.023
3/4	19.05	0.824	20.9296	8351.750
1	25.40	1.049	26.6446	2497.676
1 1/2	38.10	1.61	40.894	293.281
2	50.80	2.067	52.5018	84.084
2 1/2	63.50	2.469	62.7126	34.579
3	76.20	3.068	77.9272	11.672
5	127.00	5.047	128.1938	0.969
6	152.40	6.028	153.1112	0.399
8	203.20	8.01	203.454	0.096
10	254.00	10.02	254.508	0.031

**Anexo 8. Resultados de la caída de presión para el primer tramo de la mina modelo a 3800 m de altitud con modelo clásico.**

<b>D_nom</b>		<b>D_int</b>		<b>ΔP</b>
in	mm	in	mm	psi
1/8	3.18	0.269	6.8326	5056320.071
1/4	6.35	0.364	9.2456	1114523.010
3/8	9.53	0.493	12.5222	244546.449
1/2	12.70	0.622	15.7988	76496.935
3/4	19.05	0.824	20.9296	18748.214
1	25.40	1.049	26.6446	5606.845
1 1/2	38.10	1.61	40.894	658.365
2	50.80	2.067	52.5018	188.753
2 1/2	63.50	2.469	62.7126	77.623
3	76.20	3.068	77.9272	26.201
5	127.00	5.047	128.1938	2.175
6	152.40	6.028	153.1112	0.895
8	203.20	8.01	203.454	0.216
10	254.00	10.02	254.508	0.071

**Anexo 9 Resultados de la caída de presión para el primer tramo del modelo de mina a 3800 m de altitud utilizando la metodología propuesta.**

<b>D_nom</b>		<b>D_int</b>		<b>ΔP Darcy</b>	<b>ΔP Caída</b>
in	mm	in	mm	psi	psi
1/8	3.18	0.269	6.8326	430324	5378839
1/4	6.35	0.364	9.2456	87633	1185613
3/8	9.53	0.493	12.5222	17824	260144
1/2	12.70	0.622	15.7988	5274	81376
3/4	19.05	0.824	20.9296	1212	19944
1	25.40	1.049	26.6446	344	5964
1 1/2	38.10	1.61	40.894	37	700
2	50.80	2.067	52.5018	10	200
2 1/2	63.50	2.469	62.7126	4.140	83
3	76.20	3.068	77.9272	1.370	28
5	127.00	5.047	128.1938	0.112	2.31
6	152.40	6.028	153.1112	0.047	0.95
8	203.20	8.01	203.454	0.012	0.23
10	254.00	10.02	254.508	0.004	0.08

**Anexo 10. Resultados económicos para el caso 1.2 GA-160**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresor	73,066.60
Tuberías + Instalación	21,667
<b>Total</b>	<b>94,733.52</b>

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,517
Energía	120,267
<b>Total</b>	<b>121,783</b>

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
748569600	ft <sup>3</sup>
21197	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>

**Anexo 11. Resultados económicos para el caso 1.3 GA-110 VSD**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresor	76,533
Tuberías + Instalación	21,667
<b>Total</b>	<b>98,200</b>

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,517
Energía	133,496
<b>Total</b>	<b>135,013</b>

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
736128000	ft <sup>3</sup>
20845	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>

**Anexo 12. Resultados económicos para el caso 2.1 GA-315 200 psi y GA 110 VSD 200 psi**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresores	121,067
	28,213
Tuberías + Instalación	22,275
<b>Total</b>	<b>171,555</b>

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,559
Energía	254,965
<b>Total</b>	<b>256,525</b>

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
1,112,832,000	ft <sup>3</sup>
31,512	10 <sup>3</sup> M <sup>3</sup>

**Anexo 13. Resultados económicos para el caso 2.2 GA-355 y GA 110 VSD 200 psi**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresor	153,067
	28,213
Tuberías + Instalación	22,275
<b>Total</b>	203,555

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,559
Energía	315,099
<b>Total</b>	316,658

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
1,112,832,000	ft <sup>3</sup>
31,512	10 <sup>3</sup> M3

**Anexo 14. Resultados económicos para el caso 3.1 GA-315 200 psi y GA 110 VSD 200 psi**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresor	121,067
	28,213
Tuberías + Instalación	22,110
<b>Total</b>	171,390

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,548
Energía	254,965
<b>Total</b>	256,513

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
1116979200	ft <sup>3</sup>
31,629	10 <sup>3</sup> m3

**Anexo 15. Resultados económicos para el caso 3.2 GA-355 y GA 110 VSD 200 psi**

	<b>Costo de Inversión USD</b>
Compresor	153,067
	28,213
Tuberías + Instalación	22,110
<b>Total</b>	<b>203,390</b>

	<b>Costo de operación USD</b>
Mantenimiento	1,548
Energía	315,099
<b>Total</b>	<b>316,646</b>

<b>Producción anual</b>	<b>Unidad</b>
1116979200	ft <sup>3</sup>
31,629	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>

**Anexo 16. Temperaturas por hora del día 01 de Julio del 2018 en Orcopampa. Fig 3.18**

<b>HORA</b>	<b>TEMP.</b>	<b>SENSACIÓN TÉRMICA</b>	<b>PRECIP.</b>	<b>HUMEDAD</b>
12:00:00 a. m.	2	1	0%	50%
01:00:00 a. m.	2	0	0%	51%
02:00:00 a. m.	1	-1	0%	52%
03:00:00 a. m.	1	-1	0%	54%
04:00:00 a. m.	1	-1	0%	54%
05:00:00 a. m.	0	-2	0%	53%
06:00:00 a. m.	0	-2	0%	57%
07:00:00 a. m.	1	-1	0%	54%
08:00:00 a. m.	5	3	0%	43%
09:00:00 a. m.	9	9	0%	35%
10:00:00 a. m.	12	12	0%	28%
11:00:00 a. m.	13	13	0%	22%
12:00:00 p. m.	15	15	0%	18%
01:00:00 p. m.	15	15	0%	15%
02:00:00 p. m.	16	16	0%	15%
03:00:00 p. m.	15	15	0%	18%
04:00:00 p. m.	14	13	0%	23%
05:00:00 p. m.	12	9	0%	32%
06:00:00 p. m.	8	6	0%	41%
07:00:00 p. m.	6	4	0%	45%
08:00:00 p. m.	5	3	0%	46%
09:00:00 p. m.	4	2	0%	47%
10:00:00 p. m.	3	2	0%	51%
11:00:00 p. m.	2	1	0%	51%

**Anexo 17. Caudal al cien por ciento para cada temperatura**

<b>Temp (°C)</b>	<b>Caudal (cfm)</b>
16	3309
15	3297
14	3286
13	3274
12	3263
9	3229
8	3217
6	3194
5	3183
4	3171
3	3160
2	3149

Anexo 18. Datos para la Fig 3.20

Hora	Temperatura (°C)	Demanda (%)	Demanda (CFM)
08:00 a. m.	5	0	0
09:00 a. m.	9	0	0
09:00 a. m.	9	30	969
10:00 a. m.	12	30	979
10:00 a. m.	12	50	1632
11:00 a. m.	13	50	1637
11:00 a. m.	13	40	1310
12:00 p. m.	15	40	1319
01:00 p. m.	15	40	1319
01:00 p. m.	15	100	3297
02:00 p. m.	16	100	3309
03:00 p. m.	15	100	3297
04:00 p. m.	14	100	3286
04:00 p. m.	14	80	2629
05:00 p. m.	12	80	2610
05:00 p. m.	12	0	0
06:00 p. m.	8	0	0
06:00 p. m.	8	30	965
07:00 p. m.	6	30	958
07:00 p. m.	6	50	1597
08:00 p. m.	5	50	1591
08:00 p. m.	5	40	1273
09:00 p. m.	4	40	1269
10:00 p. m.	3	40	1264
10:00 p. m.	3	100	3160
11:00 p. m.	2	100	3149
12:00 a. m.	2	100	3149
01:00 a. m.	2	100	3149
01:00 a. m.	2	80	2519
02:00 a. m.	2	80	2519
02:00 a. m.	2	0	0