



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Diseño del sistema de aire comprimido para los frentes de  
exploración y explotación en la mina O-Nivel,  
Zaruma – El Oro.”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero/a en Minas**

**Autores**

ANDREA BELÉN CHACA ROMERO  
CARLOS MANUEL PUCHA PANJÓN

**Director**

LEONARDO ANÍBAL NÚÑEZ RODAS

**CUENCA – ECUADOR**

**2019**

## DEDICATORIA

A mis amados padres Daniel y Nancy, por su apoyo, su amor y el sacrificio que han hecho durante todos mis años de estudio, por los valores que me han inculcado para mi formación académica y personal. Son mi mayor ejemplo de esfuerzo y constancia, es un honor y un privilegio ser su hija. De igual manera a mi hermana María Augusta, por alegrar mis días con su compañía, su amor y confianza.

A mis abuelos Jaime y Lola, por poner su confianza en mí, por su amor incondicional, por preocuparse cada día por mi bienestar y siempre extender sus manos para darme apoyo, seguridad y cariño. A mi prima Susana García, por la motivación y el apoyo constante durante mi carrera.

A Diego, por su amor, sus consejos y el apoyo incondicional.

A mis amigos Carlos, Elena, Paúl, Adrián, Kevin, por su valiosa amistad y solidaridad. Así mismo, a mi amigo Erick (+), por los inolvidables recuerdos, te llevaré siempre en mi corazón.

**Andrea Belén Chaca Romero**

## **DEDICATORIA**

A mi madre, la persona más importante en mi vida, que supo apoyarme en cada uno de mis caprichos y jamás dejo de creer en mí y la persona que más me ama. Responsable de este logro en mi vida.

A Erick quien en vida fue mi hermano, amigo y rival, con el cual forme un gran equipo en este trayecto, aunque con diferentes ideas y principios, llevamos siempre un buen trabajo acompañada de un entendimiento mutuo, sin dejar atrás la alegría que generaba cada una de las ocurrencias que vivíamos. A pesar de mi carencia como un buen amigo supo abrirme las puertas de su corazón y me brindo la maravillosa oportunidad de formar parte de su vida, por estar siempre juntos en la carrera universitaria y fuera de ella, y por estar unidos espiritualmente toda la vida, gracias.

A mis queridos hermanos de sangre Alexandra y Santiago, a mis tres hermosos sobrinos que cada día me llenan de amor. Y sin olvidarme a la familia que forme con lazos de amistad Andrea y Paul.

**Carlos Manuel Pucha Panjón**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por guiarnos, cuidarnos y brindarnos todas las oportunidades para alcanzar nuestra formación académica y personal, darnos fuerza y fortaleza para realizar este trabajo, así mismo por bendecirnos con familias que nos apoyan y se sacrifican por nuestro bienestar y crecimiento académico.

A quienes fueron los principales instructores y guías en este trayecto, los miembros de nuestro tribunal Ing. Gil Álvarez e Ing. Patricio Feijoo, y de manera especial al Ing. Leonardo Núñez, director de tesis, gracias por su apoyo, colaboración y guía durante la realización de este trabajo, de igual manera a los demás maestros que nos dieron su apoyo en lo académico, y personal durante estos años de estudio.

A la Asociación de Producción Minera O-NIVEL por acogernos y darnos apertura a sus instalaciones para que realicemos nuestro proyecto de tesis. De manera especial al Ing. Geólogo Roque Maldonado por su apoyo durante nuestra estancia en la mina y su compromiso para culminar con este trabajo.

A nuestros amigos, compañeros y futuros colegas por haber formado parte de esta aventura académica y social en la universidad.

**Andrea Chaca; Carlos Pucha**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVI
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
1.1 Conceptos físicos generales .....	3
1.1.1 Presión.....	3
1.1.2 Temperatura .....	4
1.1.3 Volumen.....	4
1.1.4 Viscosidad.....	4
1.1.5 Trabajo y energía.....	5
1.1.6 Potencia.....	6
1.1.7 Caudal volumétrico .....	6
1.2.1 Gases ideales .....	8
1.2.1.1 Ley de Boyle - Mariotte .....	8
1.2.1.2 Ley de Charles – Gay Lussac.....	8
1.2.1.3 Ley de Amonton.....	9
1.2.1.4 Ley de Dalton.....	9
1.2.1.5 Ley de Amagat .....	10
1.2.1.6 Ley de Avogadro.....	10
1.3 Ley general de los gases.....	11

1.3.1 Mezcla de gases.....	12
1.4 Gases reales.....	13
1.4.1 Factor de compresibilidad.....	13
1.5 Procesos termodinámicos.....	14
1.5.1 Proceso isobárico .....	15
1.5.2 Proceso isocórico .....	16
1.5.3 Proceso isotérmico .....	17
1.5.4 Proceso adiabático.....	17
1.5.5 Proceso isentrópico .....	18
1.5.6 Proceso politrópico.....	19
1.6 Conceptos generales de flujo de fluidos.....	19
1.6.1 Clasificación de los movimientos .....	20
1.6.1.1 Flujo permanente.....	20
1.6.1.2 Flujo no permanente.....	20
1.6.1.3 Flujo uniforme.....	20
1.6.1.4 Flujo no uniforme.....	20
1.6.1.5 Flujo unidimensional.....	21
1.6.1.6 Flujo bidimensional.....	21
1.6.1.7 Flujo tridimensional .....	21
1.6.1.8 Flujo laminar .....	21
1.6.1.9 Flujo turbulento.....	22
1.6.1.10 Flujo ideal .....	22
1.7 Ecuación de continuidad .....	22
1.8 Ecuación de Bernoulli.....	23
1.9 Flujo de fluidos en tuberías.....	27
1.9.1 Velocidad de un fluido en una tubería .....	27
1.9.2 Regímenes de flujo de fluidos en tuberías .....	27
1.9.3 Número de Reynolds.....	28

1.9.3.1	Números de Reynolds críticos .....	28
1.9.4	Ecuación de Darcy –Weisbach para flujo de fluidos .....	29
1.9.5	Principios de flujo de fluidos compresibles en tuberías.....	30
1.9.6	Factor de fricción .....	31
1.9.7	Efecto del tiempo y el uso de fricción en tuberías .....	34
1.10	Flujo de fluidos en válvulas y accesorios.....	34
1.10.1	Tipos de válvulas y accesorios.....	34
1.10.2	Pérdida de presión debida a válvulas y accesorios.....	37
1.3.1	Relación entre la pérdida de presión y la velocidad de flujo .....	43
1.3.2	Coeficiente de resistencia K y longitud equivalente L/D.....	43
1.3.3	Estrechamientos y ensanchamientos .....	45
1.11	Compresores.....	45
1.11.1	Compresor alternativo.....	45
1.11.2	Compresor de paletas deslizantes.....	46
1.11.3	Compresor de anillo líquido.....	47
1.11.4	Compresor de lóbulos .....	48
1.11.5	Compresor de husillo .....	48
1.12	Sistema de aire comprimido.....	49
<b>CAPÍTULO II: LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....</b>		<b>51</b>
2.1	Ficha técnica.....	51
2.1	Ubicación .....	52
2.2	Acceso.....	55
2.3	Recursos naturales.....	56
2.3.1	Clima.....	56
2.3.2	Flora .....	56
2.3.3	Fauna.....	57

2.4	Geología regional .....	57
2.5	Geología local .....	60
2.6	Minerales, mena, ganga.....	63
2.7	Estructuras.....	63
2.8	Reservas mineras.....	64
2.9	Operaciones mineras .....	64
2.9.1	Exploración .....	64
2.9.2	Desarrollo y preparación .....	65
2.10	Secuencia de avance.....	65
2.11	Método de explotación.....	65
2.12	Almacenamiento del mineral .....	66
2.13	Sistema actual de distribución de aire comprimido .....	67
	<b>CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO .....</b>	<b>69</b>
3.1	Recolección de datos.....	69
3.1.1	Distancias de los ramales .....	69
3.1.2	Características técnicas de las máquinas perforadoras neumáticas.....	71
3.1.3	Presión atmosférica a la altitud de la mina.....	72
3.1.4	Cálculo de las longitudes equivalentes para accesorios.....	73
3.1.4.1	Válvulas de compuerta.....	73
3.1.4.2	Codo de 90° .....	74
3.1.4.3	Tee.....	75
3.1.4.4	Reducciones .....	76
3.2	Análisis de datos .....	79
3.2.1	Requerimientos de las máquinas perforadoras.....	79

3.2.2	Ajuste por consumo de altitud ( $F_1$ ) .....	79
3.2.3	Ajuste por consumo de fugas .....	79
3.2.4	Ajuste consumo por utilización efectiva .....	80
3.2.5	Ajuste de consumo por simultaneidad .....	80
3.2.6	Determinación el consumo total .....	80
3.2.7	Determinación de las longitudes de los ramales de la red propuesta .....	81
3.2.8	Balance de caudal en nodos .....	81
3.2.9	Cálculo de las longitudes equivalentes .....	83
3.2.10	Variación de presión debido a la altitud.....	86
3.2.11	Cálculo de las pérdidas de presión .....	86
3.2.11.1	Pérdidas de presión en manguera de toda la mina .....	86
3.2.11.2	Pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	92
3.2.11.3	Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	93
3.2.11.4	Presión de entrada .....	94
3.2.11.5	Cálculo de la potencia del compresor .....	97
3.2.11.6	Evaluación económica .....	97
3.2.11.7	Flujo de caja .....	98
3.2.12	Optimización del sistema de aire comprimido.....	101
3.2.12.1	Escenario 2 .....	101
3.2.12.1.1	Cálculo de longitudes equivalentes.....	101
3.2.12.1.2	Pérdidas de presión en mangueras de toda la mina.....	104
3.2.12.1.3	Pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	107
3.2.12.1.4	Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	107
3.2.12.1.5	Presión de entrada .....	107
3.2.12.1.6	Cálculo de la potencia del compresor .....	110
3.2.12.1.7	Evaluación económica .....	110
3.2.12.1.8	Flujo de caja .....	111
3.2.12.2	Escenario 3 .....	114
3.2.12.2.1	Cálculo de longitudes equivalentes.....	114
3.2.12.2.2	Pérdidas de presión en mangueras de toda la mina.....	117
3.2.12.2.3	Pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	120

3.2.12.2.4 Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles.....	120
3.2.12.2.5 Presión de entrada .....	120
3.2.12.2.6 Cálculo de la potencia del compresor .....	123
3.2.12.2.7 Evaluación económica .....	123
3.2.12.2.8 Flujo de caja .....	124
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>127</b>
4.1 Análisis de alternativas .....	127
4.2 Descripción de escenarios calculados .....	127
4.2.1 Escenario 1 .....	127
4.2.2 Escenario 2.....	128
4.2.3 Escenario 3 .....	128
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>135</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ley de Boyle.....	8
Figura 1.2 Ley de Charles. ....	9
Figura 1.3 Ley de Dalton. ....	9
Figura 1.4 Ley de Amagat.....	10
Figura 1.5 Ley general de los gases. ....	11
Figura 1.6 Porcentaje de error.....	13
Figura 1.7 Diagrama P-V de un proceso de compresión. ....	15
Figura 1.8 Proceso isobárico.....	16
Figura 1.9 Proceso isocórico.....	16
Figura 1.10 Proceso isovolumétrico.....	17
Figura 1.11 Proceso adiabático. ....	18
Figura 1.12 Proceso isentrópico.....	18
Figura 1.13 Proceso politrópico. ....	19
Figura 1.14 Descripción de flujo laminar. ....	21
Figura 1.15 Descripción de flujo turbulento. ....	22
Figura 1.16 Ecuación de continuidad.....	23
Figura 1.17 Representación Ecuación de Bernoulli.....	24
Figura 1.18 Interpretación de la ecuación de Bernoulli .....	25
Figura 1.19 Pérdidas de fricción por un tubo recto.....	29
Figura 1.20 Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial. ....	32
Figura 1.21 Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total. ....	33
Figura 1.22 Diseño de válvulas más usadas.....	35
Figura 1.23 Diseño de válvulas más usadas.....	36
Figura 1.24 Flujo de fluidos en válvulas y accesorios .....	38
Figura 1.25 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios. ....	39
Figura 1.26 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios. ....	40

Figura 1.27 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios. ....	41
Figura 1.28 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios .....	42
Figura 1.29 Compresor alternativo. ....	46
Figura 1.30 Compresor de paletas deslizantes. ....	46
Figura 1.31 Compresor de anillo líquido. ....	47
Figura 1.32 Compresor de lóbulos. ....	48
Figura 1.33 Compresor de husillo. ....	49
Figura 2.1 Mapa de ubicación del área de estudio. A: Ubicación provincial y cantonal. B: Ubicación del área de estudio en las parroquias Huertas y Muluncay. C: Vía Zaruma – Paccha, O NIVEL. ....	53
Figura 2.2 Concesión minera ‘‘O NIVEL’’. (Coordenadas WGS84). ....	54
Figura 2.3 Acceso a la mina. ....	55
Figura 2.4 Acceso a la mina, segunda alternativa. ....	56
Figura 2.5 Mapa Geológico del Ecuador Escala 1 : 100 000. Hoja Geológica de Santa Rosa. ....	57
Figura 2.6 Mapa de geología local de la concesión O NIVEL. ....	60
Figura 2.7 Geología del Distrito Minero Portovelo - Zaruma a Escala 1:1 000000. ....	62
Figura 3.1 Perforadora neumática China YT27 .....	71
Figura 3.2 Abaco factor de corrección por simultaneidad. ....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Viscosidad dinámica del aire .....	5
Tabla 1.2 Propiedades del aire. Manual sobre aire comprimido y su aplicación en la industria.....	12
Tabla 1.3 Composición de aire seco a nivel del mar. Manual sobre aire comprimido y su aplicación en la industria.....	12
Tabla 2.1 Datos generales de la concesión.....	51
Tabla 2.2 Datos de la concesión minera.....	51
Tabla 2.3 Sistema de coordenadas UTM para la concesión minera. ....	51
Tabla 2.4 Datos de la concesión minera.....	52
Tabla 2.5 Geología regional para ubicación de la mina O Nivel. ....	58
Tabla 2.6 Geología local de la concesión O Nivel.....	60
Tabla 2.7 Reservas mineras del área .....	64
Tabla 3.1 Longitudes de ramales .....	69
Tabla 3.2 Ficha técnica de perforadora YT27.....	71
Tabla 3.3 Presión Atmosférica en Función de la Altitud .....	72
Tabla 3.4 Longitudes equivalentes para accesorios .....	78
Tabla 3.5 Requerimiento total de las máquinas perforadoras .....	81
Tabla 3.6 Longitudes y caudales de los ramales .....	82
Tabla 3.7 Longitudes equivalentes para la red propuesta .....	84
Tabla 3.8 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach).....	90
Tabla 3.9 Caída de presión en mangueras en subniveles .....	92
Tabla 3.10 Optimización de caída de presión en mangueras en subniveles .....	93
Tabla 3.11 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada.....	95
Tabla 3.12 Materiales a instalar en la red propuesta.....	97
Tabla 3.13 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1 .....	99
Tabla 3.14 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 1.....	99

Tabla 3.15 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1 .....	99
Tabla 3.16 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1 .....	100
Tabla 3.17 Flujo de caja escenario 1 .....	100
Tabla 3.18 Longitudes equivalentes para el escenario 2.....	102
Tabla 3.19 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) para el escenario 2.....	105
Tabla 3.20 Caída de presión en mangueras en subniveles para el escenario 2 .....	107
Tabla 3.21 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada para el escenario 2 .....	108
Tabla 3.22 Materiales a instalar en la red propuesta.....	110
Tabla 3.23 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2 .....	111
Tabla 3.24 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 2.....	112
Tabla 3.25 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2 .....	112
Tabla 3.26 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2 .....	112
Tabla 3.27 Flujo de caja para el escenario 2 .....	113
Tabla 3.28 Longitudes equivalentes para el escenario 3.....	115
Tabla 3.29 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) para el escenario 3.....	118
Tabla 3.30 Caída de presión en mangueras en subniveles para el escenario 3 .....	120
Tabla 3.31 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada para el escenario 3 .....	121
Tabla 3.32 Materiales a instalar en la red propuesta.....	123
Tabla 3.33 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3 .....	124
Tabla 3.34 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 3.....	124
Tabla 3.35 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3 .....	125

Tabla 3.36 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3 .....	125
Tabla 3.37 Flujo de caja del escenario 3 .....	126

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1.- Nomenclatura .....	135
Anexo 2.- Tubería y accesorios para el sistema óptimo de aire comprimido .....	137
Anexo 3.- Proforma para la tubería PEAD. ....	139
Anexo 4.- Planimetría de la mina (A1). ....	140
Anexo 5.- Red de aire comprimido en el nivel O, parte A.....	141
Anexo 6.- Red de aire comprimido en el nivel O, parte B.....	142
Anexo 7.- Red de aire comprimido en el nivel P. ....	143
Anexo 8.- Red de aire comprimido en el nivel Q. ....	144
Anexo 9.- Red de aire comprimido en el nivel R.....	145
Anexo 10.- Red de aire comprimido en el nivel Ñ (norte).....	146
Anexo 11.- Red de aire comprimido en el nivel Ñ (sur).....	147
Anexo 12.- Red de aire comprimido en el nivel N. ....	148
Anexo 13.- Red de aire comprimido en el nivel M.....	149
Anexo 14.- Unión de accesorios, Detalle AA. ....	150
Anexo 15.- Unión de accesorios, Detalle AB .....	150
Anexo 16.- Unión de accesorios, Detalle AD .....	151
Anexo 17.- Unión de accesorios, Detalle AT2 .....	151
Anexo 18.- Unión de accesorios, Detalle C2 .....	152
Anexo 19.- Unión de accesorios, Detalle C3. ....	152

## RESUMEN

### DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA LOS FRENTE DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN EN LA MINA O-NIVEL, ZARUMA – EL ORO

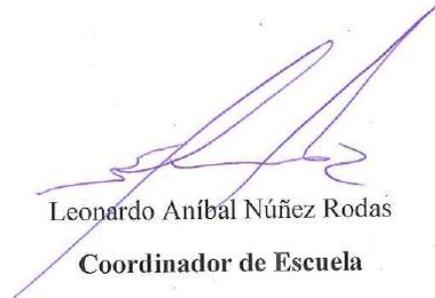
#### RESUMEN

En este trabajo investigativo se logró definir un adecuado diseño para el sistema de aire comprimido, según las necesidades de los equipos neumáticos (15 perforadoras), en la mina O-Nivel, ubicada en el distrito minero Zaruma-Portovelo. En el primer paso se identificaron las necesidades y requerimientos de los equipos de perforación a través de cálculos matemáticos; luego se plantearon tres escenarios con diferentes variables de diseño. El cálculo de longitudes equivalentes, balance de caudales, análisis de pérdidas de presión y una evaluación económica resultan primordiales para la elección del escenario óptimo; resultando el tercer escenario la mejor alternativa en cuanto a la disminución de pérdidas y una mayor rentabilidad.

**Palabras claves:** aire comprimido, caudales, presión, rentabilidad.



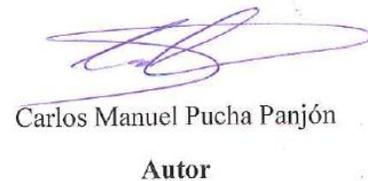
Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Director del Trabajo de Titulación**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Coordinador de Escuela**



Andrea Belén Chaca Romero  
**Autora**



Carlos Manuel Pucha Panjón  
**Autor**

## ABSTRACT

### COMPRESSED AIR SYSTEM DESIGN FOR THE EXPLORATION AND EXPLOITATION FRONTS IN THE O-NIVEL MINE, ZARUMA – EL ORO

#### ABSTRACT

In this research work, it was possible to define an adequate design for the compressed air system according to the needs of the pneumatic equipment (15 drills) in the O-Nivel mine, located in the mining district of Zaruma-Portovelo. First, the needs and requirements of the drilling equipment were identified through mathematical calculations. Then, three scenarios with different design variables were determined. The calculation of equivalent lengths, balance of flows, analysis of pressure losses and an economic evaluation were essential for the choice of the optimal scenario; resulting in the third scenario as the best alternative in terms of loss reduction and greater profitability.

**Keywords:** compressed air, flow rates, pressure, profitability.



Leonardo Anibal Núñez Rodas  
**Thesis Director**



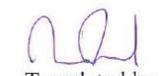
Leonardo Anibal Núñez Rodas  
**Faculty Coordinator**



Andrea Belén Chaca Romero  
**Author**



Carlos Manuel Pucha Panjón  
**Author**



Translated by  
Ing. Paúl Arpi

## INTRODUCCIÓN

La industria minera en escala pequeña en el Ecuador ha ido en un constante progreso con el fin de obtener una mayor productividad a menores costos, para ello se ha implementado la mecanización de las operaciones: perforación, voladura, transporte y beneficio del mineral. El sistema de aire comprimido ha sido fundamental para el progreso en el sistema productivo de una empresa minera al igual que el agua y la electricidad, pues tiene el objetivo de abastecer presión y caudal necesarios a los equipos neumáticos en interior mina. Se ha recurrido a este sistema con aire comprimido debido a que tiene grandes ventajas como la seguridad y bajos costos, entre los más importantes.

Los equipos neumáticos manuales predominan en su totalidad en pequeña minería en todo el país, el abastecimiento de caudales y presiones correctas para los equipos representan un factor importante que afecta directamente con la producción de la mina. El avance en el tiempo de la explotación minera se va descubriendo nuevas zonas para explotar y por lo tanto nuevas zonas a donde abastecer aire, esta situación sumada a la implementación de más perforadoras y a pérdidas por fugas, es necesario una evaluación del sistema, mejorándolo u optimizándolo con el fin de cumplir el plan de producción y evitar pérdidas económicas por tiempos muertos y desgastes en la perforadora y accesorios de la misma.

En el campo minero el mayor reto en la elaboración de un sistema de aire comprimido está en la correcta elección de los diámetros de tubería y la ubicación de los accesorios, esta decisión es fundamentalmente económica, por esta razón generalmente las tuberías usadas son de baja calidad e inseguras. Entonces el sistema debe garantizar seguridad laboral, así como la ejecución correcta de las labores de perforación.

El siguiente trabajo de tesis tiene la finalidad de analizar diferentes escenarios de sistemas de aire comprimido y mediante ello determinar el sistema más óptimo, además describir

las especificaciones técnicas de los equipos y accesorios necesarios para su implementación, mediante el reconocimiento de los equipos neumáticos, ubicación de frentes de exploración y explotación, y el cálculo de caudal y presión de aire necesarios mediante la aplicación de las leyes de los fluidos.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Conceptos físicos generales

##### 1.1.1 Presión

Se habla de presión cuando ésta es ejercida por un gas o un líquido, en el caso de los sólidos es llamado esfuerzo normal. La presión se define como la fuerza que ejerce un fluido por unidad de área. La unidad de la presión viene dada por  $\text{N/m}^2$ , conocida como pascal (Pa).

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Otras unidades que pueden ser consideradas para medir la presión son:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bar}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \text{ o } 0.9807 \text{ bar o } 98,066.5 \text{ Pa}$$

Se suele hablar de tres tipos de presiones. Por un lado, tenemos la presión manométrica, la cual es medible con el uso de un manómetro en un recipiente cerrado, por otro lado, tenemos la presión absoluta también llamada presión real. La presión absoluta es la suma de la presión manométrica y la presión atmosférica. La presión atmosférica varía en cualquier punto del planeta y según las condiciones meteorológicas en las que se encuentre. La presión absoluta se utiliza en todos los cálculos de compresores y equipos neumáticos. (Rodríguez, 2000)

$$\text{Presión}_{\text{absoluta}} = \text{Presión}_{\text{manométrica}} + \text{Presión}_{\text{atmosférica}} \quad (2)$$

La presión de vacío se genera cuando la presión de un sistema se encuentra por debajo de la presión atmosférica. Para medir la presión de vacío se utilizan manómetros que

muestran la diferencia entre la presión del punto en el que se mide y la atmosférica. Los manómetros más utilizados para medir ésta presión son los vacuómetros. Las presiones de vacío se les coloca el signo negativo (-).

$$\text{Presión}_{\text{vacío}} = \text{Presión}_{\text{atmosférica}} + \text{Presión}_{\text{absoluta}} \quad (3)$$

### 1.1.2 Temperatura

La temperatura es una propiedad que tienen los cuerpos con la que se puede medir la capacidad que tienen para transferir calor a otros. El calor es una forma de transferir energía. Esa transferencia ocurre cuando en el sistema existe un desequilibrio térmico. “Dos cuerpos que están en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio térmico entre sí”. Esto es la base para fundamentar la ley cero de la termodinámica. (Howell & Buckius, 1990)

El instrumento que se utiliza para medir la temperatura es el termómetro. El aumento o disminución de la temperatura se da por el movimiento de las moléculas. La temperatura a la cual las moléculas se encuentran inmóviles se le llama cero absoluto, siendo éste el punto de partida para medir las diferentes escalas de temperatura.

$$\text{Conversión de Celsius a Kelvin: } K = ^\circ\text{C} + 273.15$$

$$\text{Conversión de Celsius a Fahrenheit: } ^\circ\text{F} = (^\circ\text{C} * 1.8) + 32$$

$$\text{Conversión Fahrenheit a Rankine: } ^\circ\text{R} = ^\circ\text{F} + 459.69$$

### 1.1.3 Volumen

El volumen es una magnitud de tipo escalar que está definido por el espacio que ocupa un cuerpo, líquido o gas.

Cuando hablamos de equipos de aire comprimido, se utiliza el término caudal. El caudal es el volumen que se encuentra en movimiento, es decir el volumen por unidad de tiempo.

### 1.1.4 Viscosidad

La viscosidad es la propiedad distintiva de los fluidos, relaciona la fuerza cortante aplicada por unidad de superficie con la velocidad de deformación resultante. Ésta propiedad se

utiliza para medir la resistencia a fluir por interior de conductos, cuanto más grande es la viscosidad mayor es la resistencia. (de las Heras Jiménez, 2012)

La unidad de la viscosidad dinámica es  $\mu$  expresada en [Pa\*s] y para la viscosidad cinemática,  $\nu$ , se expresa en [ $\frac{cm^2}{s}$ ], es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. La viscosidad de los gases viene dado por el orden de  $10^{-5}$  y crece con la temperatura.

Tabla 1.1 Viscosidad dinámica del aire

<b>Presión Absoluta (bar)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>						
	-25	0	25	50	100	200	300
<b>1</b>	15.9	17.1	18.2	19.25	21.6	25.7	293.2
<b>5</b>	15097	17.16	18.26	19.3	21.64	25.73	29.23
<b>10</b>	16.07	17.24	18.33	19.37	21.7	25.78	29.27
<b>50</b>	16.98	18.08	19.11	20.07	22.26	26.2	29.6
<b>100</b>	18.65	19.47	20.29	21.12	23.09	26.77	30.05
<b>150</b>	21.3	21.25	21.82	22.48	24.06	27.39	30.56
<b>200</b>	23.55	23.19	23.4	23.76	24.98	28.03	31.1
<b>250</b>	26.27	25.49	25.38	25.42	26.27	28.87	31.68
<b>300</b>	29.1	27.77	27.25	27.28	27.51	29.67	32.23

Fuente: Atlas Copco. (2011).

La viscosidad de un fluido es el resultado de una resistencia o también llamada fricción interna y se manifiesta como un esfuerzo cortante a través de una tubería, esta resistencia se debe a dos fenómenos: cohesión entre moléculas y transferencia molecular de una capa a otra. La cohesión es relativamente débil en los gases, es decir, al incrementar la actividad molecular y la temperatura aumenta la viscosidad.

### 1.1.5 Trabajo y energía

El trabajo y la energía son de gran importancia tanto en la física como en la termodinámica. La energía es la capacidad para un trabajo. El trabajo mecánico se puede definir como el producto de una fuerza por la distancia en la que actúa sobre un cuerpo. Se tiene así que una fuerza aplicada perpendicularmente a un desplazamiento no produce trabajo. (Martín Bragado, 2004)

Al igual que el calor, el trabajo es energía que se transfiere de un cuerpo a otro. El trabajo mecánico está asociado con los cambios de volumen de una mezcla de gases. La unidad SI del trabajo es el Julio:  $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$ .

### 1.1.6 Potencia

La potencia es el trabajo realizado por unidad de tiempo. Es la medida de la rapidez con la que se puede hacer un trabajo. La unidad de medida SI de la potencia es el vatio:  $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ . La potencia accionada por un compresor es igual a la energía por unidad de tiempo emitido desde el sistema más el calor aplicado al gas comprimido.

### 1.1.7 Caudal volumétrico

El caudal volumétrico de un sistema es una medida del volumen por unidad de tiempo en una tubería. Se calcula multiplicando el área de la sección de la tubería y la velocidad media del mismo. La unidad SI del caudal es  $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$ , también puede ser calculada en unidades de litros  $[\frac{\text{l}}{\text{s}}]$  para hacer referencia la caudal volumétrico de un compresor.

## 1.2 Principios termodinámicos

La termodinámica es la ciencia de la energía. Un concepto básico la describe como el estudio de las fuerzas que se originan por el calor. En la actualidad este concepto ha tomado más complejidad para involucrar aspectos de las diferentes formas de energía (mecánica, química, eléctrica, etc.) y sus transformaciones, tomando en cuenta la generación de potencia, refrigeración, entre otros. (Cengel & Boles, 2012)

“La termodinámica es la ciencia que estudia las transformaciones energéticas”. Una máquina térmica es un equipo que aprovecha el calor para producir un trabajo. Las máquinas térmicas pueden realizar su trabajo de diferentes maneras, generando calor en su interior o fuera del mismo, o ya sea consumiendo trabajo mecánico para elevar o disminuir temperatura. (Müller, 2002)

La primera ley de la termodinámica nos dice que: “La energía no se crea, ni se destruye, sino que se conserva”. Si queremos generar trabajo es necesario que la presión y la temperatura sea distinta en los cuerpos que conforman el sistema, así el aire comprimido

podrá tener la misma temperatura del medio circundante, pero éste deberá ser impulsado a una presión diferente en la tubería de transporte para que pueda generar trabajo. Para el cálculo del trabajo máximo que realice el aire comprimido se deberá tomar en cuenta las condiciones en las que se encuentra conservado, debido a que posee un estado inicial de presión y temperatura, pero al ser sometido a cambios de estado puede alcanzar diferentes condiciones de esas variables. (Carranza S., Restrepo V., & Tibaquirá G., 2004)

En la naturaleza los procesos pueden producirse en su dirección preferente. Existen los procesos que son irreversibles, es decir, que poseen una sola dirección, donde el sistema y el medio no pueden volver al estado inicial, y, por el contrario, existen procesos reversibles, donde su dirección puede invertirse en cualquier punto del sistema. Pero, la segunda ley de la termodinámica define que los procesos que son reales actúan en una sola dirección, por ejemplo, transferir calor a un alambre no generará electricidad. (Cengel & Boles, 2012)

Además de ello, la segunda ley de la termodinámica establece que un sistema al absorber todo el calor de su fuente de alimentación a una temperatura constante no logrará convertirlo por completo en trabajo mecánico.

La energía tiene calidad y cantidad, por ello ésta ley limita la disponibilidad de energía determinando el grado de degradación que esta sufre al ser transportada o transformada. Si no existen los procesos reales reversibles, entonces se debe considerar los efectos que pueden alterar el estado final del sistema, como son la fricción, fugas, presión, caudales, etc. Conservar la energía durante el abastecimiento de aire comprimido es un objetivo importante, y la segunda ley de la termodinámica nos provee los medios necesarios para determinarla, y establecer la eficiencia de las máquinas térmicas.

El aire comprimido al ser considerado una fuente de energía y de potencia ayuda a que los equipos neumáticos ejerzan su labor en interior mina, es por ellos que la segunda ley de la termodinámica nos ayuda a realizar un análisis de la conversión de la energía en los sistemas neumáticos, tomando en cuenta las pérdidas que se generan durante el sistema. El trabajo útil máximo del aire comprimido depende de la altura a la que se encuentre operando la perforadora sobre el nivel del mar, debido a que presentará una variación de

presión y de las condiciones termodinámicas del medio ambiente. (Carranza S. et al., 2004)

### 1.2.1 Gases ideales

Un gas ideal se define como aquel que sus moléculas se mueven aleatoriamente sin ejercer interactuar unas con otras. Las características principales de estos gases son que se encuentran a baja presión o a altas temperaturas.

#### 1.2.1.1 Ley de Boyle - Mariotte

Establece que, a temperatura constante (isoterma), los volúmenes ocupados por una misma masa gaseosa son inversamente proporcionales a las presiones que soporta:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (4)$$

En la figura 1.1, consideremos un gas a temperatura  $T$  contenido en el recipiente (1), con un volumen  $V_1$  y una presión  $P_1$ . Cuando el gas ocupa los dos recipientes (1) y (2) tiene un volumen  $V_2$  y una Presión  $P_2$  con una temperatura  $T$ , es decir, permanecería constante. (Arenas Vera, 2017)

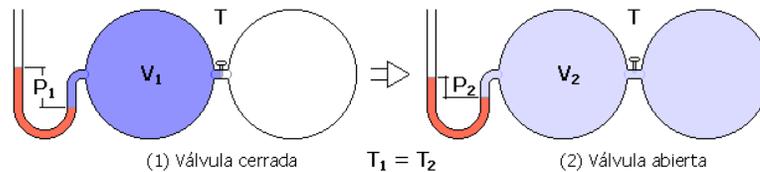


Figura 1.1 Ley de Boyle.

Fuente: Arenas, V. (2017).

#### 1.2.1.2 Ley de Charles – Gay Lussac

El volumen de un gas cambia en proporción directa a los cambios en la temperatura absoluta, manteniendo la presión constante (isobárico).

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (5)$$

En la figura 1.2, consideremos un gas contenido a presión constante en un recipiente (1), tiene un volumen  $V_1$  y una temperatura  $T_1$ . Cuando la temperatura se incrementa (producto de una fuente externa de calor) el volumen del gas también se incrementa. (Arenas Vera, 2017)

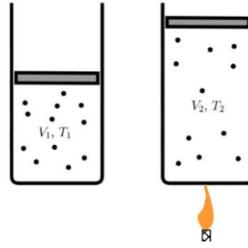


Figura 1.2 Ley de Charles.

Fuente: Arenas, V. (2017).

Estas dos leyes de los gases ideales indican que la presión, el volumen y la temperatura se encuentran relacionados.

$$P \times \frac{V}{T} = \text{Constante para una cantidad de gas dada (R)} \tag{6}$$

### 1.2.1.3 Ley de Amonton

Establece a volumen constante (isocórico), la presión de un gas, varía en relación directa con la temperatura absoluta.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} \tag{7}$$

### 1.2.1.4 Ley de Dalton

La ley de Dalton de las presiones aditivas indica que se puede realizar la suma de las presiones de dos gases al ser mezclados, pero cada gas debe estar sometido al mismo volumen y temperatura.

$$P_{\text{Mezcla}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \tag{8}$$

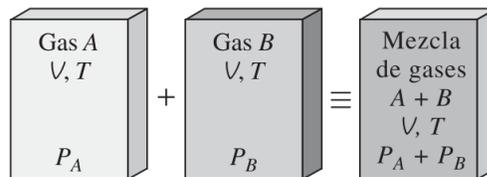


Figura 1.3 Ley de Dalton.

Fuente: Y. Cengel, M. Boles. (2012). Termodinámica. [Libro].

Esta ley se aplica durante la compresión de cualquier mezcla de gases. Cuando se comprime aire húmedo, el compresor maneja aire y vapor de agua. El aire seco puede ser

considerado como gas, ya que no hay variación de la composición del aire seco durante el proceso de compresión. La presión atmosférica es la suma de la presión parcial del aire seco y la presión parcial del vapor de agua.

### 1.2.1.5 Ley de Amagat

La ley de Amagat de volúmenes aditivos sugiere que se puede realizar la suma de volúmenes de dos gases al ser mezclados, pero cada gas debe estar sometido a la misma presión y temperatura.

$$V_{\text{Mezcla}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (9)$$

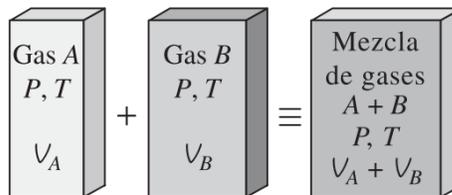


Figura 1.4 Ley de Amagat.

Fuente: Y. Cengel, M. Boles. (2012).

### 1.2.1.6 Ley de Avogadro

Una mol es una unidad de medida definida por la cantidad de materia en un número determinado de partículas. El término mol se utiliza para cuantificar una cantidad determinada de átomos y/o moléculas, debido a que, al ser cantidades muy elevadas, utilizar términos como docenas, millones o miles de millones no tendría sentido.

En la fórmula para determinar el número de moles por cantidad de sustancia, es igual a la masa total de la misma para el peso molecular.

$$n = \frac{m}{M} \quad (10)$$

La ley de Avogadro establece que, en dos recipientes del mismo gas, contenidos en iguales volúmenes, sometidos a las mismas condiciones de temperatura y presión, existe en ellos el mismo número de moléculas. Por lo tanto, la masa correspondiente a un peso molecular corresponde a una misma cantidad de moléculas. El número de moléculas en un peso molecular se denomina por lo tanto número de Avogadro. (Müller, 2002)

$$N_A = 6.02257 \times 10^{23} \text{ mol o moléculas}^{-1}$$

### 1.3 Ley general de los gases

La ley general de los gases es una combinación de la ley de Boyle y la ley de Charles. Indica cómo se relacionan entre sí la presión, el volumen y la temperatura. El cambio de una de estas variables afecta al menos a una de las otras dos. (Atlas Copco, 2011)

Teniendo en cuenta las tres ecuaciones de los gases mencionadas anteriormente (ecuación 4, ecuación 5, ecuación 10), se puede hallar la ecuación que relaciona las tres leyes.

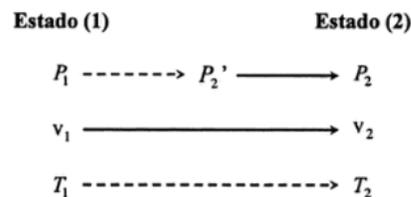


Figura 1.5 Ley general de los gases.

Fuente: Valera Negrete, José. (2005).

$$\frac{P_2'}{T_2} = \frac{P_1}{T_1} \text{ a volumen específico constante}$$

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

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 \text{ a temperatura constante}$$

$$P_2' = \frac{P_2 v_2}{v_1}$$

Igualando las expresiones  $P_2'$

$$\frac{P_1 T_2}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{v_1}$$

Para “n” estados diferentes

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n v_n}{T_n} = R \text{ (cte)}$$

En forma general para cualquier estado

$$\frac{P v}{T} = R \text{ ----> } P v = R T$$

Si  $v = \frac{V}{m}$  para masa constante “m”, entonces

$$P \frac{V}{m} = R T$$

Por último

$$P V = m R T \quad (11)$$

La ecuación (11) corresponde a la ecuación de la ley general de los gases, donde R es una constante particular para cada gas. (Valera Negrete, 2005)

### 1.3.1 Mezcla de gases

El fluido que será necesario transportar hacia los equipos neumáticos de perforación ubicados en los frentes de exploración y explotación, puede ser precisamente aire u otro gas de propiedades conocidas. Es importante determinar las propiedades y características de cualquier mezcla de gases que se necesiten en cualquier proceso, analizando su composición de mezcla. Para el caso del aire comprimido, ya han sido determinadas sus propiedades y composición.

Tabla 1.2 Propiedades del aire. Manual sobre aire comprimido y su aplicación en la industria.

Descripción	Unidad	Valor
Peso molecular	kg/mol	28.96
Densidad del gas a +20°C y 100 KPa (1 Bar)	kg/m <sup>3</sup>	1.205
Punto de ebullición a 1 bar	K	79.82
Punto de congelación a 1 bar	K	57.61
Constante de gas R	J/(K*Kg)	286.9
Presión crítica	kPa	3.78
Temperatura crítica	K	132.5

Fuente: Atlas Copco. (2011).

Tabla 1.3 Composición de aire seco a nivel del mar. Manual sobre aire comprimido y su aplicación en la industria

Gas	Volumen %	Peso%
Nitrógeno - N <sub>2</sub>	78.084	75.52
Oxígeno - O <sub>2</sub>	20.947	23.142
Argón - Ar	0.934	1.288
Dióxido de carbono - CO <sub>2</sub>	0.0314	0.0477
Neón - Ne	0.001818	0.001267
Helio - He	0.000524	0.0000724
Kriptón - Kr	0.000114	0.00033
Xenón - Xe	0.0000087	0.000039
Hidrógeno - H <sub>2</sub>	0.00005	0.000003
Metano - CH <sub>4</sub>	0.0002	0.0001
Óxido nitroso - N <sub>2</sub> O	0.00005	0.00008
Ozono - O <sub>3</sub>	0 – 0.000007	– 0.00001

Fuente: Atlas Copco. (2011).

## 1.4 Gases reales

### 1.4.1 Factor de compresibilidad

La ecuación de los gases ideales (ecuación 11) es muy simple y utilizada, pero, existe una región en la que los gases tienden a desviarse de manera importante, llamada región de saturación y punto crítico. Figura 1.6. (Cengel & Boles, 2012)

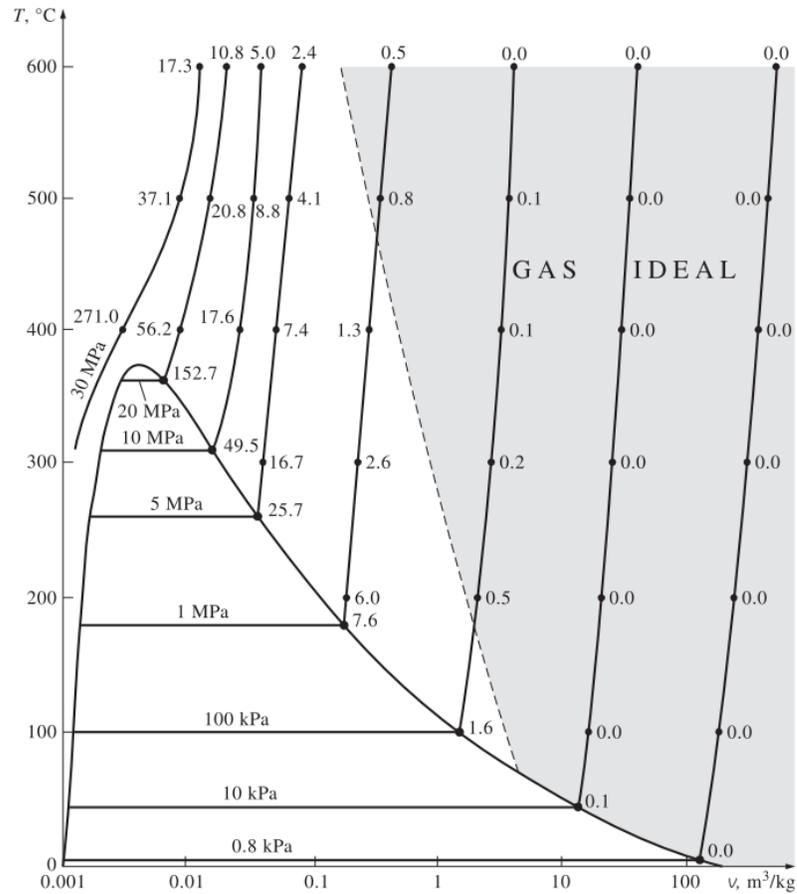


Figura 1.6 Porcentaje de error.

Fuente: Y. Cengel, M. Boles. (2012).

Esta desviación existe a una temperatura y presión específicas, y se la puede expresar mediante el uso de un factor de corrección llamado factor de compresibilidad Z, definido a través de la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{Pv}{RT} \tag{12}$$

se puede expresar también

$$Z = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{ideal}}} \quad (13)$$

donde  $v_{\text{ideal}}$  es  $\frac{RT}{P}$

Para los gases ideales  $Z$  corresponde a un valor de 1, mientras que para los gases reales  $Z$  correspondería a un valor mayor o menor a 1, como vemos en la figura 1.6.

El factor de compresibilidad permite realizar correcciones muy precisas para los efectos de los gases reales en todos los estados por los que podría estar.

La temperatura crítica es aquel límite en donde un gas ya no puede condensarse sin importar la magnitud de la presión a la que se encuentra ejercido. Por otro lado, la presión requerida para condensar cualquier gas a su temperatura crítica se denomina presión crítica.

El comportamiento de los gases varía de acuerdo a determinadas presiones y temperaturas, pero se comportan de manera muy parecida cuando se encuentran a temperaturas y presiones normalizadas con respecto a sus temperaturas y presiones críticas. La normalización se efectúa a través de las siguientes ecuaciones. (Cengel & Boles, 2012)

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad \text{y} \quad T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad (14)$$

donde  $P_R$  es la presión reducida y  $T_R$  temperatura reducida.

El factor  $Z$  para todos los gases es aproximadamente el mismo a iguales presión y temperatura reducidas, lo cual recibe el nombre de principio de estados correspondientes.

### 1.5 Procesos termodinámicos

Un proceso termodinámico considera un sistema que conecta dos estados termodinámicos diferentes o casi similares. El sistema experimenta una transformación termodinámica cuando se modifica algunas de las variables del sistema manteniendo una de ella constante. El prefijo *iso-* se usa con frecuencia para designar un proceso con ésta particularidad. Éstas variables pueden ser: presión, volumen o temperatura, y cada cambio se denomina: proceso isobárico, isocórico e isotérmico respectivamente. Los distintos

procesos termodinámicos pueden estudiarse mediante trayectorias en un diagrama Presión - Volumen (P-V). Estas trayectorias son características de cada tipo de proceso. (Medina Domínguez & Ovejero Sánchez, 2010)

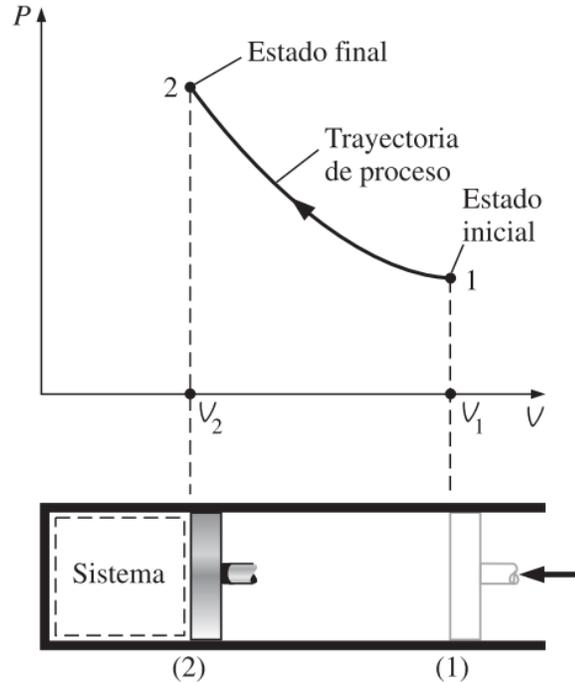


Figura 1.7 Diagrama P-V de un proceso de compresión.

Fuente: Y. Cengel, M. Boles. (2012).

Existen también procesos que depende como se encuentren su estado inicial y final. Si los estados inicial y final coinciden se dice que el proceso es cíclico. Un proceso es elemental o infinitesimal cuando las variables termodinámicas que intervienen experimentan variaciones muy pequeñas. Un proceso se dice que es cuasi estático no disipativo o reversible cuando es secuencia continua de estados de equilibrio. Se denomina proceso irreversible a todo aquel que no es reversible. (Medina Domínguez & Ovejero Sánchez, 2010)

### 1.5.1 Proceso isobárico

El cambio isobárico de estado significa que la presión es constante, el volumen y la temperatura cambian. Para cambiar el volumen del estado 1 al estado 2, debe existir una remoción de calor del sistema.

$$Q = m \times c_p \times (T_2 - T_1) \quad (15)$$

$Q$  = cantidad de calor (J)

$m$  = masa (kg)

$c_p$  = calor específico a presión constante (J/kgK)

$T$  = temperatura absoluta (K)

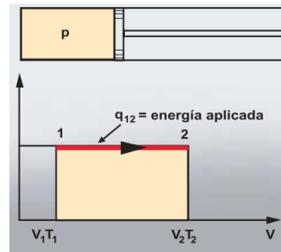


Figura 1.8 Proceso isobárico.

Fuente: Atlas Copco. (2011).

### 1.5.2 Proceso isocórico

El cambio isocórico de estado significa que el volumen permanece constante, la presión y la temperatura cambian. Para elevar la presión del estado 1 al estado 2 debe suministrarse calor al sistema. El cambio de temperatura es proporcional a la relación de presión.

$$Q = m \times c_v \times (T_2 - T_1) \quad (16)$$

$Q$  = cantidad de calor (J)

$m$  = masa (kg)

$c_v$  = calor específico a volumen constante (J/kgK)

$T$  = temperatura absoluta (K)

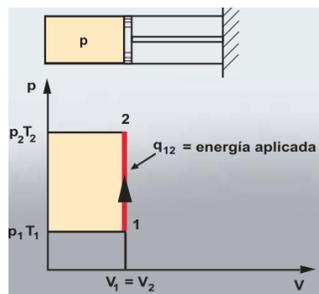


Figura 1.9 Proceso isocórico.

Fuente: Atlas Copco. (2011).

### 1.5.3 Proceso isotérmico

El cambio isotérmico de estado significa que la temperatura permanece constante, la presión y el volumen cambian. Al comprimir un gas del estado 1 al estado 2 hay que eliminar calor del sistema para mantener la temperatura constante.

$$Q = m \times R \times T \times \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (17)$$

$$Q = p_1 \times V_1 \times T \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Q = cantidad de calor (J)

m = masa (kg)

R = constante de gas individual (J/kgK)

T = temperatura absoluta (K)

V = volumen (m<sup>3</sup>)

p = presión absoluta (Pa)

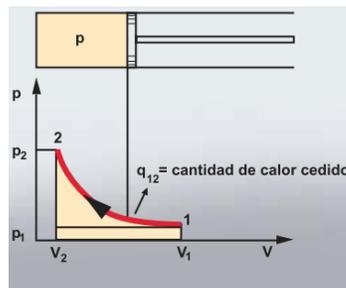


Figura 1.10 Proceso isovolumétrico.

Fuente: Atlas Copco. (2011).

### 1.5.4 Proceso adiabático

Es el proceso en el cual no existe intercambio de calor entre el sistema y su entorno. Es un proceso reversible. El calentamiento y enfriamiento adiabático son procesos que comúnmente ocurren debido al cambio en la presión de un gas. Esto puede ser cuantificado usando la ley de los gases ideales. En otras palabras, se considera proceso adiabático a un sistema especial en el cual no se pierde ni tampoco se gana energía calorífica.

$$PV^k = \text{constante}$$

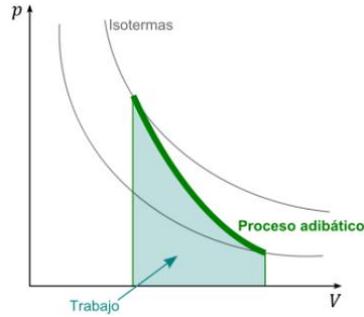


Figura 1.11 Proceso adiabático.

Fuente: Arenas, V. (2017).

### 1.5.5 Proceso isentrópico

Cuando la entropía en un gas que está siendo comprimido o expandido es constante, no se produce intercambio de calor con el entorno. Existe un proceso isentrópico cuando un gas se comprime en un cilindro totalmente aislado sin ningún intercambio de calor con el entorno. También puede existir si un gas se expande a través de una tubería tan rápidamente que no hay tiempo de que se produzca intercambio de calor con el entorno. (Atlas Copco, 2011)

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \quad \text{o} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (18)$$

p = presión absoluta (Pa)

V = volumen ( $m^3$ )

T = temperatura absoluta (K)

$k = \frac{C_p}{C_v}$  = exponente isentrópico

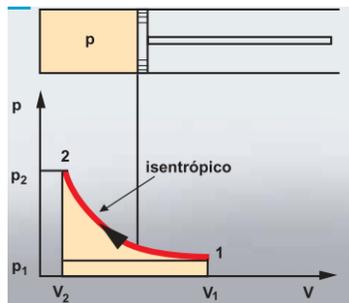


Figura 1.12 Proceso isentrópico.

Fuente: Atlas Copco. (2011).

### 1.5.6 Proceso politrópico

El proceso isotérmico implica un intercambio de calor total con el entorno, mientras que el proceso isotrópico no implica ningún intercambio de calor. En realidad, todos los procesos de compresión están comprendidos entre estos dos procesos mencionados.

$$P \times V^n = \text{constante}$$

$P$  = presión absoluta (Pa)

$V$  = volumen ( $m^3$ )

Donde  $n$  puede tomar cualquier valor, siendo  $n$  los procesos más comunes:

Proceso isobárico:  $n = 0$

Proceso isotérmico:  $n = 1$

Proceso isentrópico:  $n = k$

Proceso isocórico:  $n = \infty$

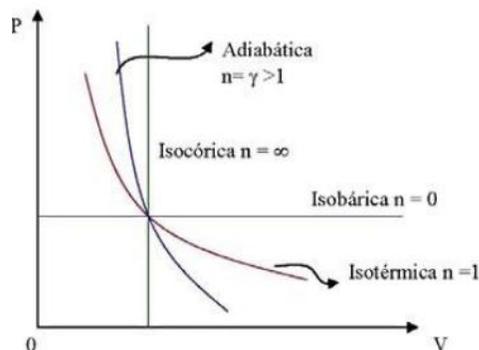


Figura 1.13 Proceso politrópico.

*Figura 1.1 Proceso politrópico.*

Fuente: Arenas, V. (2017).

## 1.6 Conceptos generales de flujo de fluidos

La estática de fluidos viene dada por un equilibrio de sus partículas es decir que estas permanecen en reposo o que no tienen aceleración permaneciendo a una velocidad constante y al movimiento o desplazamiento de las partículas, se le denomina flujo, éste movimiento en la naturaleza es complejo, en donde la base para predecir estos desplazamientos es la experimentación. El trabajo conjunto de la mecánica y los principios

de la termodinámica con la experimentación ha permitido la construcción de máquinas y estructuras.

## 1.6.1 Clasificación de los movimientos

### 1.6.1.1 Flujo permanente

En este desplazamiento las propiedades del fluido y la naturaleza del mismo en cualquier punto no cambian en el tiempo, se dice que es permanente cuando la velocidad, presión, la masa volumétrica y la temperatura no dependen del tiempo en cada punto.

$$\frac{\delta V}{\delta t} = 0, \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0, \frac{\delta P}{\delta t} = 0, \frac{\delta T}{\delta t} = 0 \quad (19)$$

En la mayoría de problemas de canales abiertos es necesario considerar un movimiento permanente, solo en el caso que las propiedades de flujo cambien considerablemente éste debe ser analizado como movimiento no permanente.

### 1.6.1.2 Flujo no permanente

Este movimiento cambia con el tiempo, es decir la velocidad, presión, masa volumétrica y temperatura dependen del tiempo.

$$\frac{\delta V}{\delta t} \neq 0, \frac{\delta \rho}{\delta t} \neq 0, \frac{\delta P}{\delta t} \neq 0, \frac{\delta T}{\delta t} \neq 0 \quad (20)$$

### 1.6.1.3 Flujo uniforme

Este movimiento ocurre cuando el vector de velocidad de un punto a otro no cambia en su magnitud, sentido y dirección, es decir las variables presión, densidad, masa volumétrica permanecen constantes en cualquier parte del fluido con respecto al espacio. El flujo uniforme en la naturaleza es poco probable que suceda esto se debe a que los canales son irregulares o no prismático, incluso en canales prismáticos es poco probable que sea uniforme.

$$\frac{\delta V}{\delta s} = 0 \quad (21)$$

### 1.6.1.4 Flujo no uniforme

El vector de velocidad varía de un punto de otro, es decir, existen cambios de velocidad con respecto al tiempo. Este tipo de flujo se encuentra cerca de fronteras sólidas por efecto

de la viscosidad. En un sistema de conducción de un fluido con tuberías de diferente sección representaría un movimiento no uniforme.

$$\frac{\delta V}{\delta s} \neq 0 \quad (22)$$

### 1.6.1.5 Flujo unidimensional

Este movimiento ocurre cuando el vector de velocidad solo depende de una variable espacial, los vectores de velocidades son paralelos y tienen la misma magnitud, estos movimientos pueden darse en tuberías largas y rectas o placas paralelas.

### 1.6.1.6 Flujo bidimensional

En este caso el vector velocidad depende de dos variables espaciales, este flujo supone que el movimiento de las partículas sigue trayectorias similares en planos paralelos, en donde no hay cambios del flujo normal en dichos planos.

### 1.6.1.7 Flujo tridimensional

Cuando el vector de velocidad está en función de tres variables se le denomina tridimensional, esto se debe a que la velocidad en cualquier punto requiere de tres coordenadas para localizar un punto en el espacio.

### 1.6.1.8 Flujo laminar

Se le denomina al movimiento del fluido ordenado o regular, estratificado y suave, se mueve en láminas o capas casi paralelas entre sí. Este movimiento está gobernado por la Ley de viscosidad de Newton que relaciona a la tensión de cortadura con la velocidad angular de la deformación. Cuando existe este flujo, el fluido simula moverse como si fueran capas una sobre otra, esto es debido a su viscosidad, un ejemplo claro es la miel espesa que se vierte en una botella.

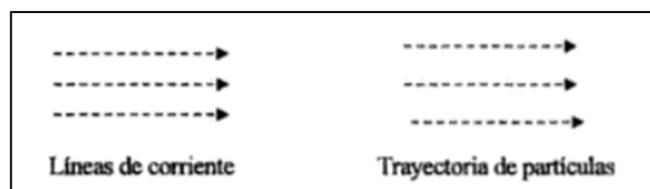


Figura 1.14 Descripción de flujo laminar.

Fuente: Duarte, C. (2004).

### 1.6.1.9 Flujo turbulento

También denominado corriente turbulenta, es un movimiento desordenado o caótico por lo cual la trayectoria de las partículas va formando remolinos debido a la colisión de las partículas, este movimiento es importante ya que provoca pérdidas de energía. Las partículas que fluyen en el intercambio de movimiento pueden tener diferentes tamaños desde muy pequeñas a partículas muy grandes. La disipación de energía mecánica es mucho mayor en un flujo turbulento que laminar, por eso es mejor controlar a que el flujo no se haga turbulento.

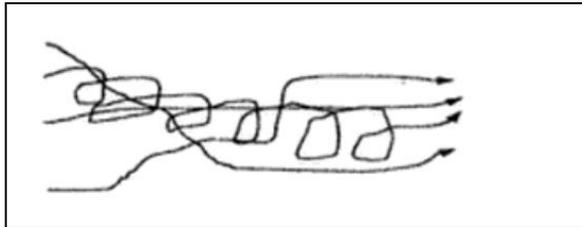


Figura 1.15 Descripción de flujo turbulento.

Fuente: Duarte, C. (2004).

### 1.6.1.10 Flujo ideal

Se le denomina flujo ideal aquel fluido de viscosidad nula, incompresible y deformable cuanto se les somete a esfuerzos cortantes. Un fluido sin rozamiento se supone que es un fluido que carece de viscosidad y que no es turbulento, es decir no existe conversión de energía mecánica térmica en movimiento. Cuando un fluido ideal está en reposo, todas sus partículas deben tener la misma energía mecánica total. A este tipo de flujo se le denomina potencial.

Cualquiera que sea la naturaleza de flujo, se debe cumplir:

- La Ley de Newton de movimiento, para cualquier partícula y en cualquier momento.
- La Ecuación de continuidad
- Primer y Segundo principio de la Termodinámica

## 1.7 Ecuación de continuidad

Cuando un fluido incompresible llena por su totalidad un conducto (tubería), si por un extremo entra cierta cantidad de fluido, esta misma cantidad saldrá por el otro extremo,

es decir la cantidad de fluido que circula a través de cualquier sección en cierta cantidad de tiempo permanece constante. (Robert L. Mott, 2002)

Si un flujo entra por un extremo con un caudal  $Q_1$ , por el otro extremo sale un caudal  $Q_2$  de igual valor, así pues:

$$Q_1=Q_2$$

El caudal o gasto es igual a la velocidad del fluido por el área transversal del conducto. (J. w. Kane/ M. M. Sternheim, 2007)

$$Q=Av$$

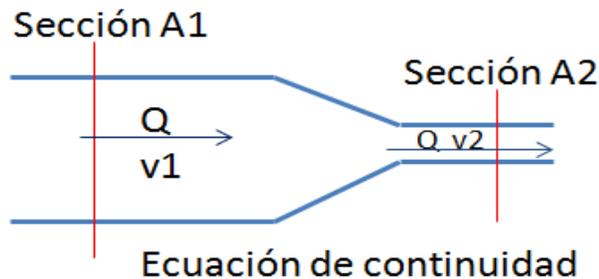


Figura 1.16 Ecuación de continuidad.

Entonces cuando un conducto tenga diferentes secciones:

$$A_1v_1=A_2v_2 \quad (23)$$

Fórmula general de la continuidad, fórmula analítica que representa la conservación de la masa, se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área del flujo y su velocidad en un sistema de dos secciones en donde existe un flujo estable. (Robert L. Mott, 2002)

### 1.8 Ecuación de Bernoulli

Esta ecuación es una forma de representar el balance de energía mecánica, esto se debe a que todos los términos de la ecuación son escalares y tienen unidades de energía por unidad de masa, cuando se analizan problemas de flujo en conductos se deben tomar en cuenta tres energías: energía potencial, energía cinética y energía de flujo, ya que un fluido puede tener elevación, presión y velocidad. (Orozco Flores, 1998)

a. Energía potencial, viene representada por:

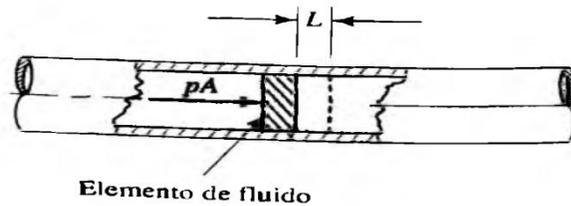
$$EP = wz \quad (24)$$

b. Energía cinética: en función de la velocidad

$$EC = \frac{wv^2}{2g} \quad (25)$$

Energía de flujo, es la cantidad de energía que se necesita para mover un elemento fluido a través de una sección contra la presión (p). (Mott, 2002)

$$EF = \frac{wp}{\gamma} \quad (26)$$



Activar Wind

Figura 1.17 Representación Ecuación de Bernoulli.

Fuente: Mott, R. (2002).

Esta fórmula se obtiene a partir de:

En la figura se muestra que el elemento fluido se mueve en la tubería a través de una sección, la fuerza que actúa sobre este elemento es pA (presión y área respectivamente), recorre una distancia L igual a la longitud del elemento. (Mott, 2002)

Entonces:

$$\text{Trabajo} = \rho AL = \rho V$$

Donde V es el volumen del elemento. El peso del elemento w es

$$w = \gamma V$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es

$$V = \frac{w}{\gamma}$$

Y obtenemos

$$\text{Trabajo} = \rho V = \frac{\rho w}{\gamma}$$

Denominada energía de flujo, y se representa con la ecuación 26

Entonces la energía total (E) es la suma de estas tres energías

$$E = E_F + E_P + E_C$$

$$E = \frac{w\rho}{\gamma} + wz + \frac{wv^2}{2g} \quad (27)$$

Las unidades de energía utilizadas en el sistema internacional es Newton-metro (N-m) y en el sistema inglés es pie-libra (pie- lb).

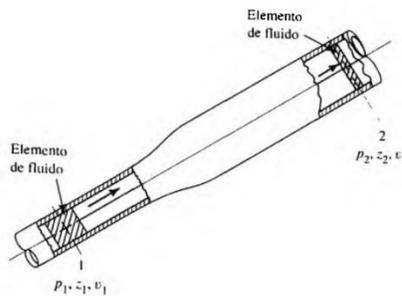


Figura 1.18 Interpretación de la ecuación de Bernoulli

Fuente: Mott, R. (2002).

En la figura se puede observar el movimiento del elemento de fluido de una sección 1 a una sección 2, en donde los valores de  $p$ ,  $z$  y  $v$  son diferentes; entonces la energía total es:

En la sección 1,

$$E_1 = \frac{w\rho_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g}$$

En la sección 2,

$$E_2 = \frac{w\rho_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g}$$

Según el principio de conservación:

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{w\rho_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{w\rho_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g}$$

Simplificando:

$$\frac{\rho_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\rho_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (28)$$

A esta ecuación se le conoce como Ecuación de Bernoulli, al disminuir la sección transversal del tubo de corriente sin límites, Bernoulli establece que a lo largo de una línea de corriente la energía mecánica por unidad de masa se conserva. A lo largo de una línea de corriente. (Robert L. Mott, 2002)

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{cte} \quad (29)$$

Para utilizar la ecuación de Bernoulli se debe tomar en consideración:

- El flujo debe ser incompresible, su densidad debe permanecer constante.
- Los rozamientos no son apreciables en el flujo, es ideal. No hay pérdidas de energía mecánicas por rozamiento.
- El flujo es estacionario, en ningún caso turbulento.
- No debe haber dispositivos mecánicos que agreguen o retiren energía mecánica.
- No puede existir transferencia de calor hacia el fluido o fuera de este.

Pero en un sistema de conducción también es necesario considerar las pérdidas o incremento de energía esto debido a los rozamientos, por lo tanto

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + h_L = \text{cte} \quad (30)$$

$h_L$  pérdida de altura en metros de fluido

Y de acuerdo al sistema inglés quedaría

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{144P}{\rho} + h_L = \text{cte} \quad (31)$$

$h_L$  pérdida de altura en pies de fluido

## 1.9 Flujo de fluidos en tuberías

En minería el uso de fluidos como el agua y aire son indispensables para la productividad de la actividad y abastecimiento de máquinas neumáticas para ello el método de transporte de fluido se realiza a través de un sistema de tuberías (secciones circulares), debido a que en una naturaleza real el movimiento de un fluido es difícil de predecir y calcular con métodos convencionales, este cálculo debe estar sujeto a una experimentación, sin embargo una fórmula que puede ser utilizada para cualquier fluido y predecir su comportamiento es la fórmula de Darcy. (CRANE, 1992)

### 1.9.1 Velocidad de un fluido en una tubería

La velocidad de un fluido es muy variable desde la parte de las paredes de la tubería hasta el punto centro de la misma. La velocidad junto a la pared es cero (fluido está en contacto con la pared estacionaria) y mientras más se aleja de las paredes aumenta, es decir, la velocidad en el centro es la máxima  $v_m$ . Debido a esto en el flujo de fluidos es conveniente trabajar con una velocidad promedio  $v$ , ya que esta permanece constante en un flujo incompresible y a una sección constante.

La velocidad en cada capa concéntrica de cada fluido varía continuamente de  $v_m$  a cero al alejarse del eje central, por lo tanto, para un flujo laminar la velocidad media del fluido es la mitad de la velocidad máxima ( $v=v_m/2$ ).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (32)$$

### 1.9.2 Regímenes de flujo de fluidos en tuberías

En una tubería se distinguen tres tipos de flujo, laminar, en la zona de transición y flujo turbulento. La diferencia entre estas velocidades se basa en velocidad crítica. La velocidad crítica es la velocidad por debajo del cual toda turbulencia es amortiguada por acción de la viscosidad del fluido. Si la velocidad media es menor a la velocidad crítica el fluido es laminar, por el contrario, si la velocidad media es mayor a la velocidad crítica se le considera turbulento y si la velocidad media es igual a la velocidad crítica se dice que está en la zona de transición. (Arana Vargas, Cayo Veizaga, Gutiérrez Alcocer, Mérida Jailita, & Meneces Catarí, 2016)

### 1.9.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un cálculo de una cantidad adimensional que relaciona las variables importantes para el flujo: velocidad, tamaño de la trayectoria de flujo, densidad y viscosidad del fluido. La pérdida de energía de un flujo depende si este es laminar y turbulento, por esto se necesita conocer un método que nos ayude a predecir el tipo de flujo, sin necesidad de percibirlo en la realidad. El flujo en tuberías de sección circular depende de cuatro variables: densidad del fluido  $\rho$ , viscosidad del tubo  $n$ , diámetro del tubo  $D$  y velocidad media  $v$ . Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que a partir de una cantidad adimensional se puede conocer el tipo de flujo (laminar o turbulento), a esta cantidad se le denomina a número de Reynolds  $N_R$ . (Robert L. Mott, 2002)

La ecuación es la siguiente:

$$N_R = \frac{vD\rho}{n} = \frac{vD}{\nu} \quad (33)$$

En donde  $\nu = n/\rho$  (viscosidad cinemática). (Robert L. Mott, 2002)

La mayoría de flujos tienen números de Reynolds elevados esto se debe a la velocidad alta o una viscosidad muy baja, y generalmente tienden a ser turbulentos.

#### 1.9.3.1 Números de Reynolds críticos

En condiciones reales en el flujo de tubería existe una región en donde no se puede distinguir si el flujo es laminar o turbulento, a esta región se le denomina región crítica. El número de Reynolds donde el flujo para ser turbulento se denomina número de Reynolds crítico. El valor del número de Reynolds crítico varía dependiendo de características geométricas y condiciones de flujo distintas. (R., 1995)

En las practicas cuando un flujo se encuentra en la zona de flujo crítica y no se conoce el tipo de flujo, es indispensable cambiar la tasa de flujo o el diámetro de la tubería, para obtener un flujo ya sea laminar o turbulento, y obtener resultados más precisos. (Mott, 2002)

En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería de sección circular cumple: es laminar cuando  $N_R \leq 2300$  y es turbulento  $N_R \geq 4000$ . (R., 1995)

### 1.9.4 Ecuación de Darcy –Weisbach para flujo de fluidos

En la ecuación 13 se determinó que  $h_L$  es la pérdida de energía en el sistema. El principal factor para la pérdida de esta energía se debe a la fricción. En el caso del movimiento de fluido por tuberías, la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud al diámetro de la corriente. Si se conecta dos manómetros Bourdon uno en cada extremo de una tubería por el cual pasa un fluido. El manómetro P1 tendrá una presión estática mayor que el manómetro P2, debido a las pérdidas existentes. Como se representa en la siguiente figura. (Robert L. Mott, 2002)

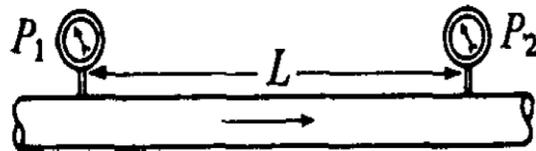


Figura 1.19 Pérdidas de fricción por un tubo recto.

Fuente: Crane. (1992).

Para calcular las pérdidas de carga de fricción para el sistema se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_L = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (34)$$

Donde L es la longitud de la corriente de flujo en metros o pies. (Robert L. Mott, 2002)

La ecuación puede también escribirse para obtener una pérdida de energía en psi, de esta manera:

$$h_L = f \frac{\rho Lv^2}{2.88Dg} \quad (35)$$

La ecuación se puede utilizar para el cálculo de pérdida de energía debido a la fricción en secciones largas y de tubos redondos de un flujo laminar o turbulento. La ecuación 2.4 se aplica tuberías de sección constante, a través de una tubería recta ya sea horizontal, vertical o inclinada. En tuberías de sección variable se calcula de acuerdo a la ecuación de Bernoulli. (Robert L. Mott, 2002)

### 1.9.5 Principios de flujo de fluidos compresibles en tuberías

En el flujo compresible interviene una nueva variable la densidad y una nueva ecuación. Determinar la pérdida exacta de presión de un flujo compresible que circula por una tubería requiere tener un conocimiento de la relación entre el peso específico y la presión (no es fácil determinar para cada problema particular). Los casos extremos son considerados los flujos adiabático e isotérmico. El análisis de un flujo incompresible es necesario estudiar la ecuación de la continuidad, cantidad de movimiento, primera y segunda ley de la termodinámica. (CRANE, 1992)

El flujo adiabático ocurre en tuberías cortas y bien aisladas. Esto se debe a que no se transfiere calor desde el interior o recibe calor de la parte externa de la tubería, exceptuando el calor que se genera por la fricción. El flujo isotérmico ocurre muy a menudo esto se debe a que se acerca más a la realidad de un flujo en una tubería. El caso extremo sucede en las tuberías de gas natural.

Los flujos compresibles se encuentran en dispositivos que incluyen el flujo de gases a altas velocidades. Estos flujos combinan la dinámica de fluidos y la termodinámica, fundamentos teóricos necesarios.

La relación entre la presión y volumen específico puede adoptar cualquier forma, llamado flujo politrópico, la información específica en cada caso es prácticamente imposible. La densidad de los vapores y gases varían considerablemente con la presión. Por lo tanto, si en la figura 1.19 la caída de presión entre  $P_1$  y  $P_2$  es grande, la velocidad y densidad varían considerablemente. (CRANE, 1992)

Al trabajar con fluidos compresibles como el aire o vapores se debe tomar en cuenta:

- Si la caída de presión calculada entre  $P_1$  y  $P_2$  es inferior al 10% de la presión de entrada, se obtiene una exactitud razonable si el volumen específico que se introduce en el formula se basa en las condiciones de entrada o en las condiciones de salida, cualesquiera que sean conocidas.
- Si la pérdida de presión calculada entre  $P_1$  y  $P_2$  es superior a 10% y menor al 40 % de la presión de entrada, se puede emplear con precisión la fórmula de Darcy, utilizando

un volumen específico resultado de la media entre el volumen específico de entrada y volumen específico de salida.

- Para mayores pérdidas de presión, se utilizan métodos detallados en: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías de Crane Company, New York USA, 1996.

### 1.9.6 Factor de fricción

El factor de fricción  $f$  es un valor que se debe determinar experimentalmente. En un flujo laminar el factor de fricción está en función del número de Reynolds, mientras que un flujo turbulento está en función del tipo de pared de tubería. Las pérdidas de energía por fricción ocurren conforme el aire pasa a través de secciones rectas, mientras que las pérdidas dinámicas lo hacen cuando pasan por acoplamientos y controladores de flujo.

En la zona de transición en donde no se conoce si el flujo es laminar o turbulento, el factor de fricción es indeterminado y tiene límites bajos si el flujo es laminar, y altos si el flujo es turbulento.

La pérdida de energía debido a la fricción en un flujo laminar puede ser calculada con la siguiente ecuación. (Robert L. Mott, 2002)

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (36)$$

En un flujo turbulento el factor de fricción depende no solo del número de Reynolds, sino de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería, la rugosidad relativa es la relación entre la rugosidad promedio y el diámetro de tubería ( $\epsilon/D$ ). Es más conveniente utilizar la fórmula de Darcy para calcular las pérdidas de fricción.

Como el tipo de superficie interna de las tuberías comercial es independiente del diámetro, la rugosidad de las paredes tiene más efecto en el factor de fricción. Por lo tanto, las tuberías de menor diámetro se acercan a la condición de gran rugosidad, tienen un mayor coeficiente de fricción en comparación con tubería del mismo material, pero de diámetros superiores.

Uno de los métodos más utilizados para determinar el factor de fricción  $f$ , se emplea el diagrama de Moody.

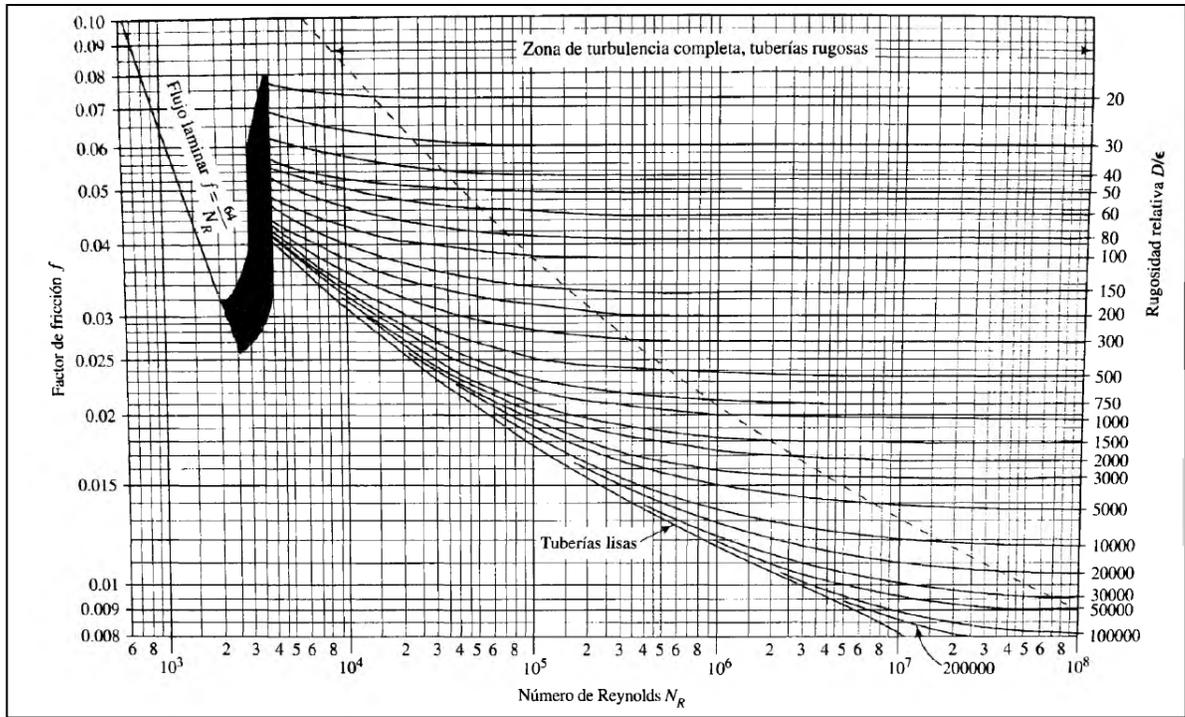


Figura 1.20 Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial.

Fuente: Crane. (1992).

En la figura 1.20 el diagrama muestra la gráfica del factor de fricción versus el número de Reynolds  $N_R$ , con una serie de líneas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa, estas curvas las generó L. F. Moody a partir de datos experimentales. ( Mott, 2002)

Ecuación de factor de fricción de Moody

$$f = 0.0055 \left( 1 + \left( 2 \times 10^4 \times \frac{\epsilon}{D} + \frac{10^6}{N_R} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \tag{37}$$

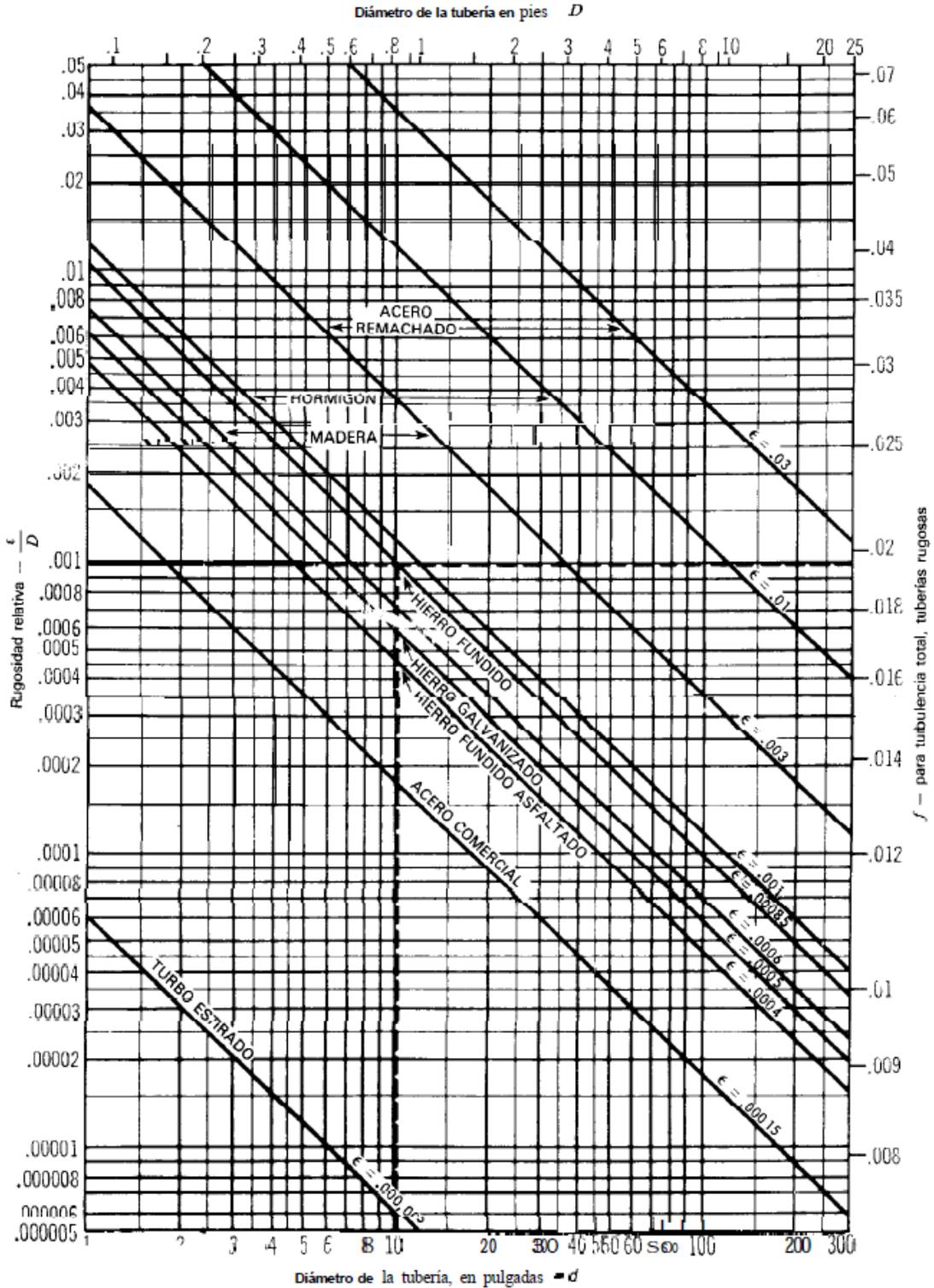


Figura 1.21 Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total.

Fuente: Crane. (1992).

### **1.9.7 Efecto del tiempo y el uso de fricción en tuberías**

La mayoría de autores han dado valores para el coeficiente de rugosidad que se refiere en una parte a tuberías nuevas y otra a tuberías en uso. Las pérdidas de fricción en las tuberías son dadas por el cambio del diámetro y de la rugosidad en las paredes de la tubería. En muchos de los servicios, el interior de la tubería se va incrustando con sarro, tierra y otros materiales extraños, por lo tanto, es una práctica prudente dar margen para reducciones del margen del paso.

Los coeficientes que deben emplearse en la práctica técnica son los correspondientes a tuberías de servicio, puesto que al cabo de un cierto tiempo, las tuberías presentaran características propias de uso. La precisión de los resultados va a depender en gran medida del valor de la rugosidad del material empleado. Los expertos dicen que la rugosidad aumenta con el uso de la tubería. (Franquet Bernis, 2005)

### **1.10 Flujo de fluidos en válvulas y accesorios**

Un sistema de transporte de un fluido de un punto a otro en un nivel industrial no solo es indispensable conocer las propiedades y características de las tuberías sino también de válvulas y accesorios que también pertenecen al sistema, especialmente conocer la resistencia al fluido y mediante este determinar las características de flujo de un sistema de tuberías completo. Es común que los elementos que controlan la dirección o el flujo volumétrico de un fluido en el sistema genera pequeñas turbulencias, que genera que se disipe energía en forma de calor. Las pérdidas de energía por las válvulas y accesorios en un sistema grande son pequeñas a comparación de pérdidas de energía por fricción en las tuberías, dichas perdidas reciben el nombre de pérdidas menores. (Robert L. Mott, 2002)

#### **1.10.1 Tipos de válvulas y accesorios**

Las válvulas permiten controlar y administrar el flujo que es transportada por un sistema de tubería, sirven para dos funciones principales, cierre y estrangulación. Existen varios tipos de válvulas que impide una clasificación completa. Se clasificarán según su resistencia que ofrecen al flujo, de esta manera: válvulas de baja resistencia (válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa) y válvulas de alta resistencia que tienen un cambio en la dirección del flujo (válvulas de globo y angulares). (CRANE, 1992)

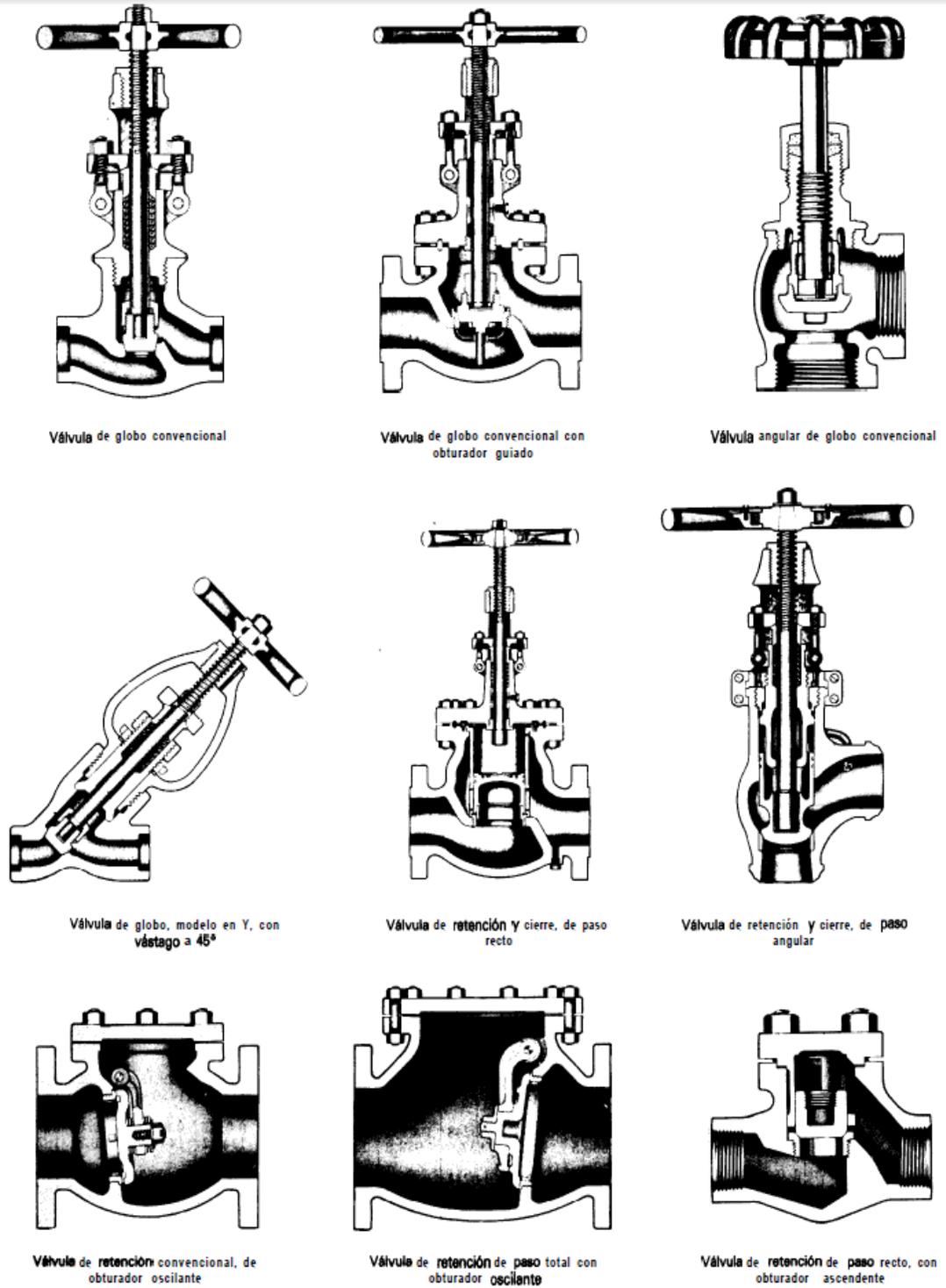
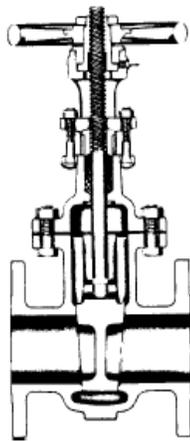


Figura 1.22 Diseño de válvulas más usadas.

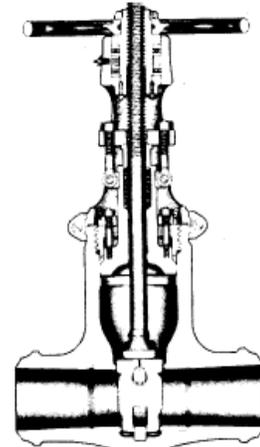
Fuente: Crane. (1992).



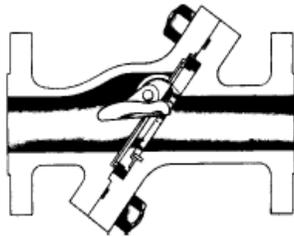
Válvula da compuerta da **cuña** (tapa atornillad.4



Válvula de mariposa da rendimiento alto



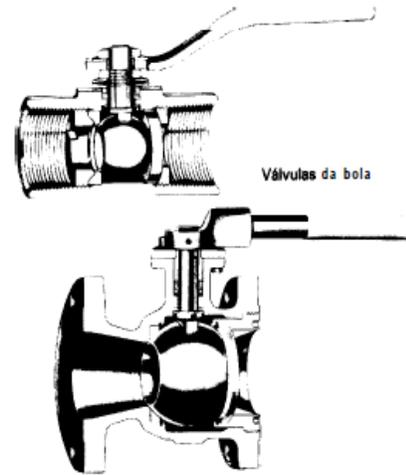
Válvula da compuerta de **cuña flexible** (tapa con sello a presión)



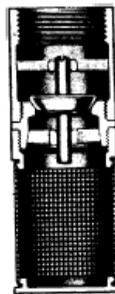
Válvula de retención de **disco basculante**



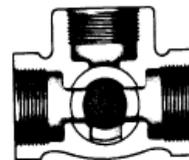
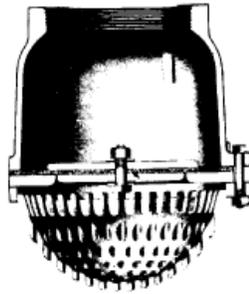
Válvula de mariposa sin bridas



Válvulas da bola



Válvulas de pie tipos **oscilante y ascendente**



**Llave de tres vías**  
Vistas exterior y en sección



Figura 1.23 Diseño de válvulas más usadas.

Fuente: Crane. (1992).

Los acoplamientos o accesorios tienen la función de conexión en un sistema de transporte de fluido por tuberías se clasifican en: de derivación, (tes, cruces, codos con salida lateral etc.) reducción, ampliación y desviación. Los accesorios se pueden combinar.

Los conectores de reducción o ampliación son los que cambian la superficie de paso de fluido (reducciones y manguitos). Los accesorios de desvío, curvas, codos, curvas en U, etc., son los que cambian la dirección del flujo.

### **1.10.2 Pérdida de presión debida a válvulas y accesorios**

Un fluido que se desplaza por un sistema de tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo dada por la velocidad sobre el diámetro de tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo que altere o cambie la dirección de la corriente del fluido en la tubería, ya sea parcial o total, altera la forma característica. De esta forma se genera turbulencia que a su vez genera pérdidas de energía en el sistema mayor a la que se produce generalmente en un flujo por una tubería recta. Las válvulas y accesorios alteran la característica del flujo, por lo tanto, ocasionan pérdidas de presión.

Estas pérdidas consisten en:

- a. Pérdida de presión dentro de la válvula
- b. La pérdida de presión en la tubería de entrada es mayor de la que se produce normalmente si no existe válvula en la línea. Este efecto es pequeño.
- c. La pérdida de presión en la salida de la tubería es mayor a la que se produce normalmente si no hubiera válvula en la línea. Este efecto puede ser muy pequeño.

Desde un punto de vista experimental es difícil predecir las tres caídas de presión, sin embargo, el efecto combinado es la cantidad importante. Esta cantidad puede medirse con métodos conocidos.

La siguiente figura 1.24 muestra dos tramos de tuberías de mismo diámetro y longitud. El tramo superior contiene una válvula de globo. Si las pérdidas de presión  $\Delta P_1$  Y  $\Delta P_2$  son medidas entre puntos indicados,  $\Delta P_1$  es mayor a  $\Delta P_2$ .

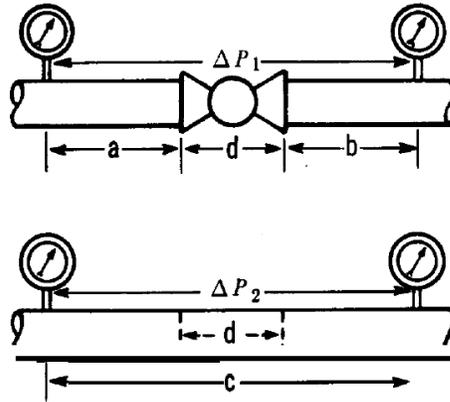


Figura 1.24 Flujo de fluidos en válvulas y accesorios

Fuente: Crane. (1992).

La pérdida debido a la válvula de longitud resulta de  $\Delta P_1$  menos la pérdida en un tramo de tubería de longitud con longitud "a + b". Las pérdidas están en función del coeficiente de resistencia "K" de las válvulas y accesorios se detallan a continuación.

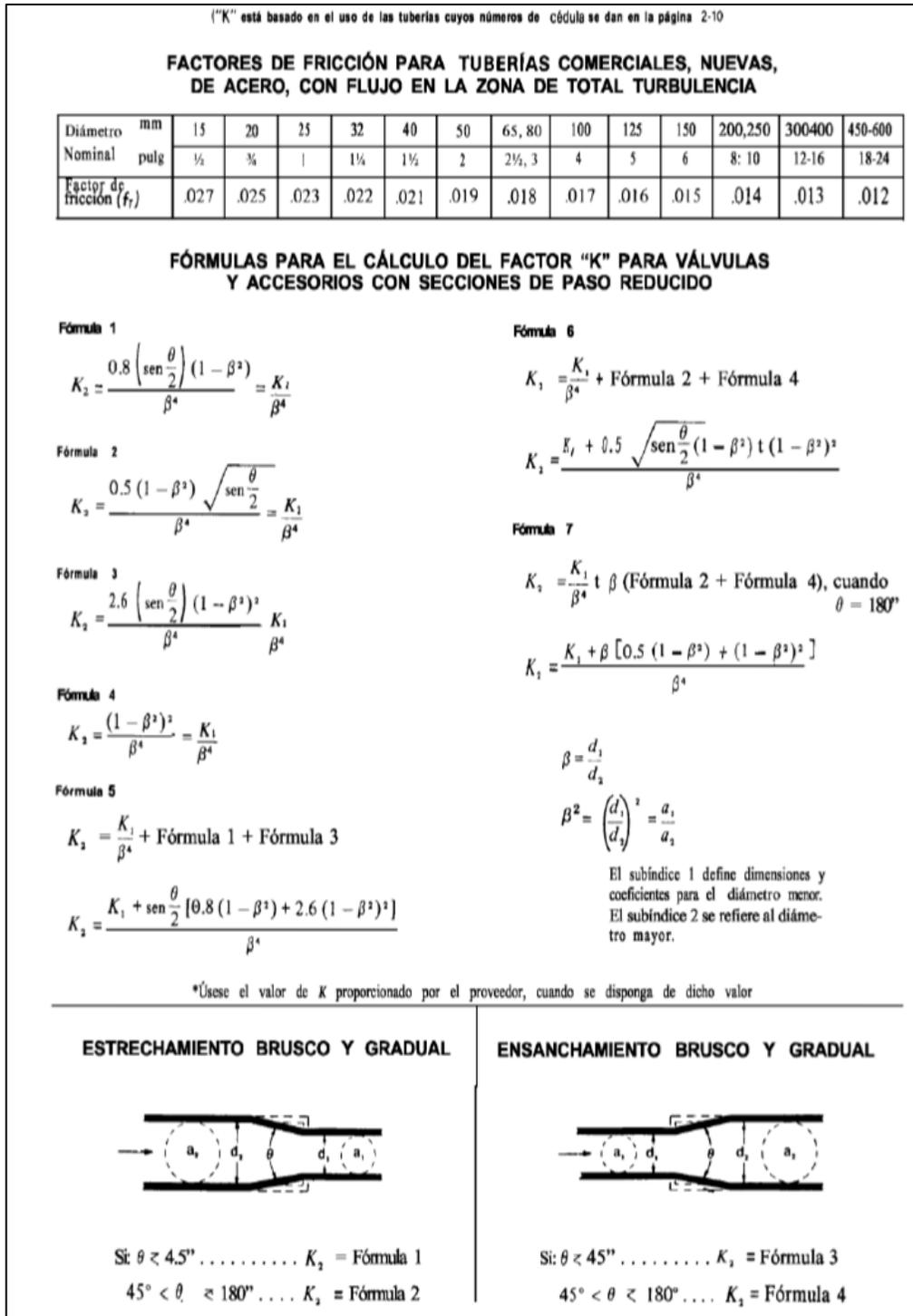


Figura 1.25 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios.

Fuente: Crane. (1992).

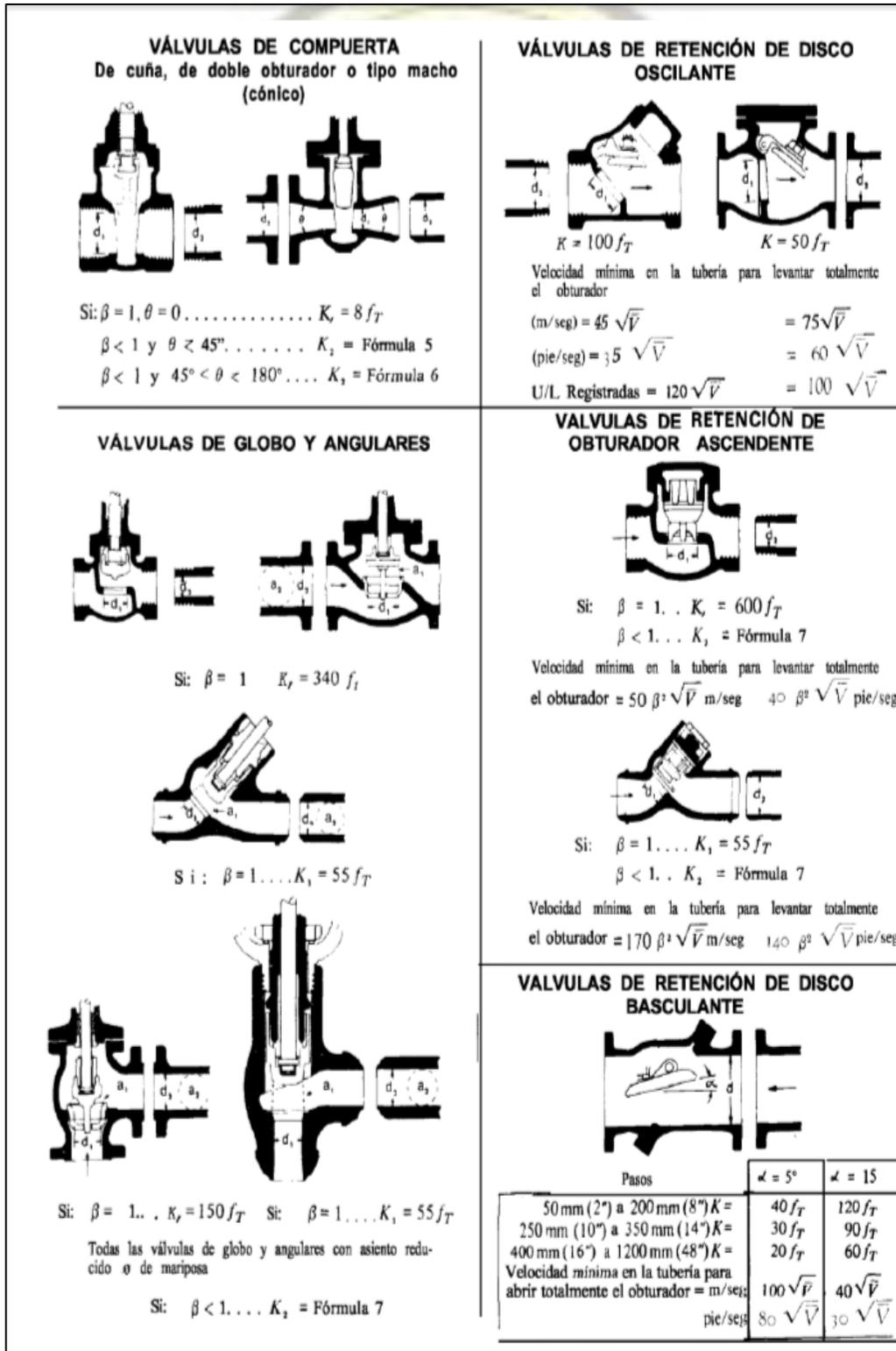


Figura 1.26 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios.

Fuente: Crane. (1992).

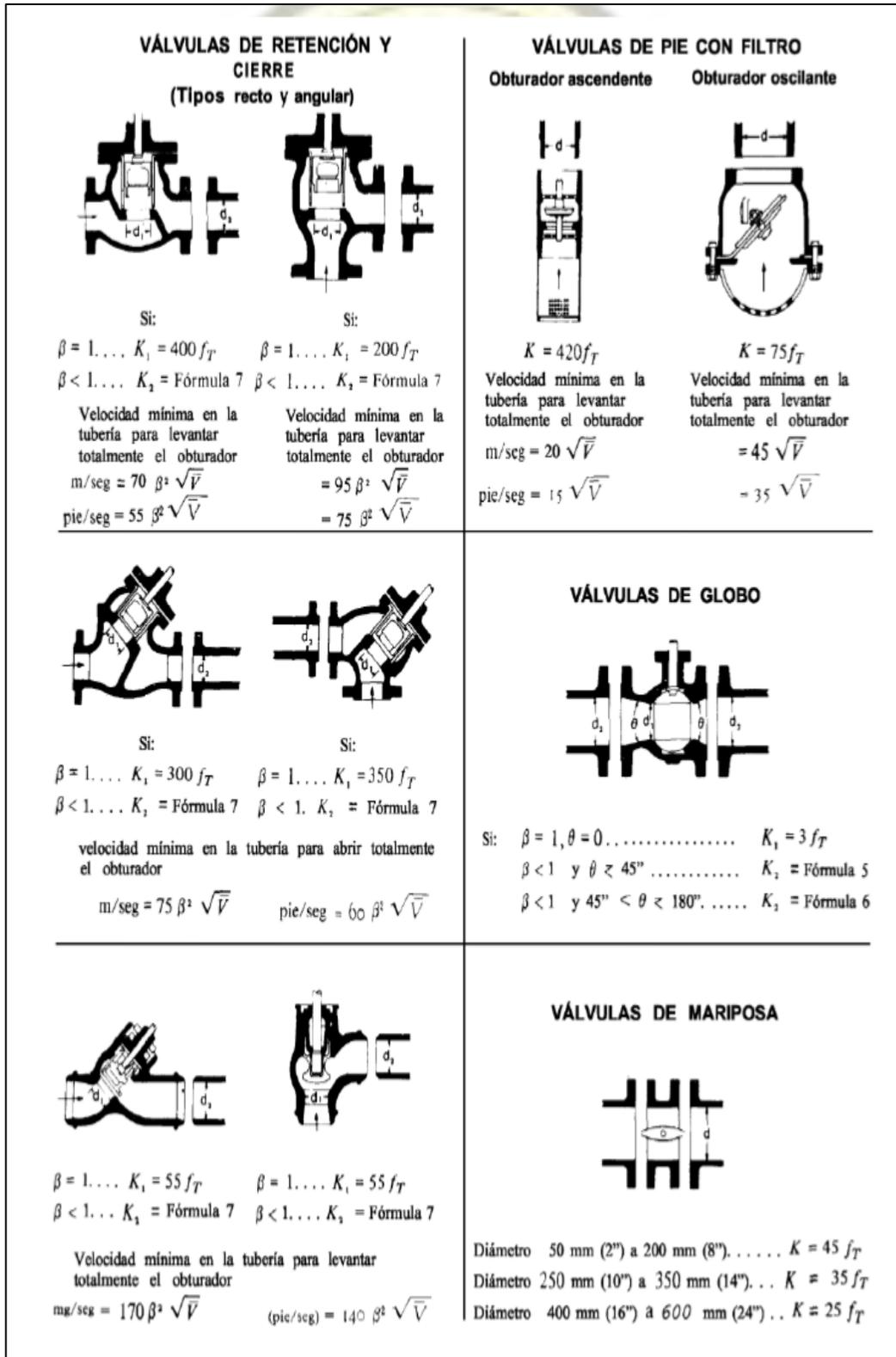


Figura 1.27 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios.

Fuente: Crane. (1992).

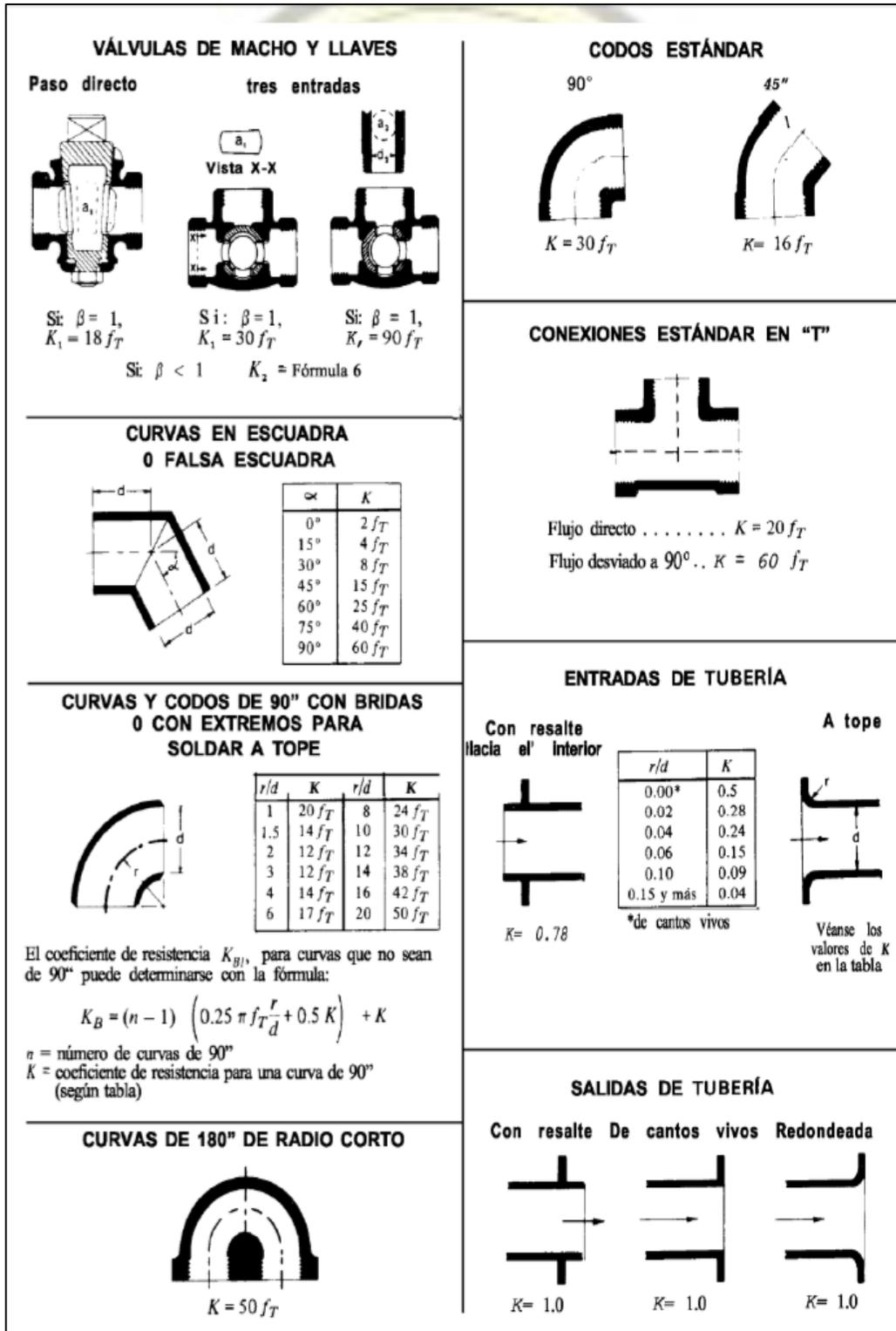


Figura 1.28 Coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios

Fuente: Crane. (1992).

### 1.3.1 Relación entre la pérdida de presión y la velocidad de flujo

Los experimentos han demostrado en su mayoría, que la pérdida de presión por efecto de las válvulas y accesorios es proporcional a la velocidad elevada a un exponente constante. La gráfica que relaciona la pérdida de presión contra la velocidad en coordenadas logarítmicas, la curva resultante es una línea recta. En un flujo turbulento este exponente tiene un valor que varía aproximadamente entre 1.8 y 2.1 para diseños de válvulas y accesorios. Sin embargo, en todos los casos prácticos, se acepta que la pérdida de presión debido al flujo de fluidos en régimen turbulento en válvulas y accesorios varía con el cuadrado de la velocidad.

### 1.3.2 Coeficiente de resistencia K y longitud equivalente L/D

Se han obtenido datos de pérdidas de presión para una gran variedad de válvulas y accesorios, fruto de la experimentación. Sin embargo, es imposible obtener datos de pruebas para cada medida, tipo de válvula y conexión, debido a costos y tiempo. Para ello se expone medios confiables de extrapolación, a partir de información disponible de otras pruebas. Los conceptos que usan a menudo para llevar a cabo esto son la “longitud equivalente L/D”, “coeficiente de resistencia K”, y “coeficiente de flujo  $C_v$  o  $K_v$ ”.

La velocidad en una tubería se obtiene partir de la presión o altura estática, y el descenso de la altura estática o pérdida de presión debida la velocidad es ecuación de Bernoulli

$$h_1 = \frac{V^2}{2g}$$

Se define como “altura de velocidad”. El flujo por una válvula y accesorios ocasionan caídas de presión, puede expresarse en función de la altura de la velocidad. El coeficiente K en la ecuación.

Coeficiente de resistencia K

$$h_1 = K \frac{V^2}{2g} \quad (38)$$

Se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio. Está siempre asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad.

En la mayoría de los casos las pérdidas por fricción en las válvulas y accesorios son mínimas a lo largo de una longitud real. Por lo tanto, el coeficiente de resistencia  $K$  se considera independiente del factor de fricción y número de Reynolds, que puede tratarse como constante para cualquier obstáculo dado, en un sistema de tuberías bajo cualquier condición de flujo.

Entonces la misma pérdida de expresión por la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_L = f \frac{LV^2}{2Dg}$$

Coeficiente de resistencia  $K$

$$K = f \frac{L}{D} \quad (39)$$

La relación  $L/D$  es la longitud equivalente en diámetros de tubería que causa la misma pérdida de energía que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo. Hay consideraciones que deben ser tomadas:

- El coeficiente de resistencia  $K$ , es en teoría constante para cada medida de un cierto diseño o línea de válvulas y accesorios (geoméricamente similares).
- La similitud geométrica es poco probable que suceda.
- El coeficiente de resistencia  $K$ , de acuerdo a datos experimentales para una línea de válvulas o accesorios, tiende a variar con la medida.

En la figura 1.25 (coeficiente de resistencia  $K$  para válvulas y accesorios) se muestran los coeficientes de resistencia  $K$  para cada tipo de válvula o accesorio  $q$  se ilustran. Estos coeficientes resultan de la multiplicación del factor de fricción por la medida deseada de tubería nueva de acero comercial y flujo de zona de turbulencia completa, por una constante, que representa la longitud equivalente  $L/D$  de la válvula de accesorio en diámetros de tubería por las mismas condiciones de flujo. La longitud equivalente es constante para cada tipo de válvula y accesorio con el cual se identifica.

Ajustando  $K$  en la ecuación 31 en proporción a la cuarta potencia de diámetros y basar los valores de velocidad o diámetro en el diámetro interno de la tubería a que se conecte.

$$K_a = K_b \frac{(Da)^4}{(Db)^4} \quad (40)$$

El subíndice a define K y D con referencia al diámetro interno de la tubería en cuestión. El subíndice b define K y D con referencia al diámetro interno de la tubería en donde se establecieron los valores de K.

### 1.3.3 Estrechamientos y ensanchamientos

La resistencia al flujo debida a estrechamientos y ensanchamientos bruscos puede ser expresada por:

Resistencia debido a ensanchamientos

$$K_1 = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2 \quad (41)$$

Resistencia debido a estrechamientos

$$K_1 = 0.5 \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \quad (42)$$

## 1.11 Compresores

Se denomina compresores a las máquinas que cumplen el trabajo de comprimir gases, el compresor aspira aire de la atmosfera y lo comprime en un volumen más pequeño. Se pueden distinguir dos tipos de compresores volumétricos (el aumento de presión se consigue por la disminución del volumen de gas confinado en una cámara y el proceso de compresión es pulsante, proceso de compresión discontinua) y de flujo (logra el aumento de presión por la transformación de energía cinética, en energía de presión, proceso de compresión continuo). En la industria predomina cinco tipos de compresores, que se agrupan en dos grandes familias: compresores de desplazamiento positivo y compresores rotodinámicos o turbocompresores.

### 1.11.1 Compresor alternativo

El compresor alternativo son máquinas de desplazamiento positivo y utiliza un pistón en un cilindro para comprimir el aire. El compresor puede incorporar un cilindro o puede comprimir el aire con dos cilindros. Estos cilindros pueden estar ubicados verticalmente, horizontales o con inclinación. Este tipo de compresor juega un papel importante en el

control de capacidad puesto que la misma debe ajustarse a la demanda del proceso. El control puede ser manual o automático y a su vez continuo o discontinuo.

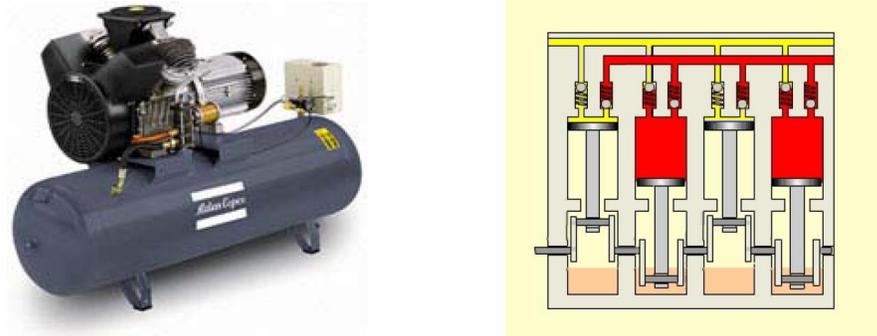


Figura 1.29 Compresor alternativo.

Fuente: EPS. (2005).

### 1.11.2 Compresor de paletas deslizantes

Son compresores rotativos que utilizan unas paletas colocadas excéntricamente dentro del rotor de la máquina. Cada unidad tiene un rotor montado en forma excéntrica dentro de un cilindro de chaquetas de agua. El rotor está equipado con paletas que tienen libertad de movimiento radial hacia dentro y hacia afuera de las ranuras longitudinales. Al ir girando, el espacio existente entre las paletas va disminuyendo permitiendo que el aire atrapado se comprima.

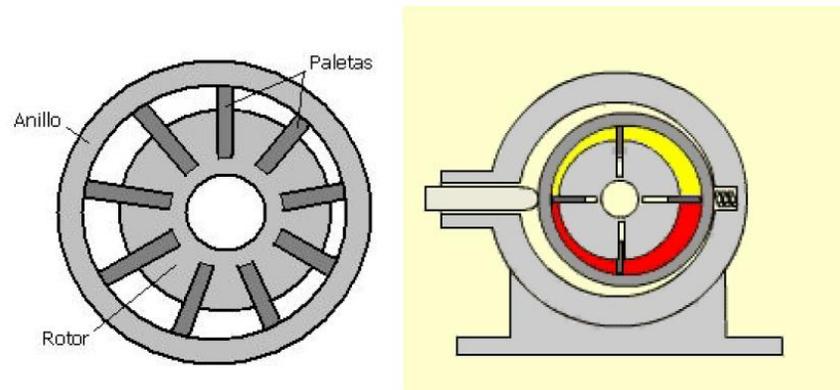


Figura 1.30 Compresor de paletas deslizantes.

Fuente: EPS. (2005).

Los compresores de paletas deslizantes suelen encontrarse en aplicaciones de perforación de pozos mediante chorros de aire, transportación neumática, recuperación de vapores químicos y petrolíferos, transmisión de gas y sistemas de aire en plantas pequeñas.

### 1.11.3 Compresor de anillo líquido

Representan un subgrupo dentro de las dos categorías importantes de los compresores, dinámico y de desplazamiento. Estas máquinas emplean un líquido para desplazar los gases, comúnmente se puede clasificar como compresores volumétricos con desplazantes líquidos. Emplean un rotor de álabes fijos dentro de un envolvente elíptica, que está parcialmente lleno de líquido. Al girar el rotor, los álabes ponen en movimiento al líquido, penetran en la película del líquido y comprimen el aire que queda atrapado. Son compresores libres de aceite, apropiados para el manejo de sustancias inflamables, explosivas o biosanitarias.



Figura 1.31 Compresor de anillo líquido.

Fuente: EPS. (2005).

Los compresores de anillo líquido por lo general son equivalente funcional a las bombas de anillo líquido. Su diferencia es la construcción de doble lóbulo del compresor, lo que provoca un balance de las fuerzas radiales que debe soportar el rotor. Este compresor tolera el acarreo, a medida que el sello líquido amortigua los sólidos suaves y líquidos de entrada y los va lavando hasta la descarga. Los compresores de anillo líquido sellados con agua en realidad depuran con gran eficiencia partículas tan pequeñas como las bacterias aéreas.

### 1.11.4 Compresor de lóbulos

Los compresores de lóbulo son de desplazamiento positivo, también se les denomina máquinas de pistón rotatorio o bombas de gas. Se utilizan para manejar vapores y gas no corrosivos. Los modelos más básicos suelen diseñarse con impulsores de hierro dúctil de eje integral que tienen perfil en involuta. Los engranajes de sincronización están montados en forma cónica sobre los ejes, y por lo general, se utilizan rodamientos cilíndricos. Los extremos de la unidad están lubricados con aceite esparcido. Funcionan de manera similar a una bomba de engranaje. Al girar el aire atrapado entre los lóbulos del rodete y la carcasa de la máquina es impulsado hacia la salida.

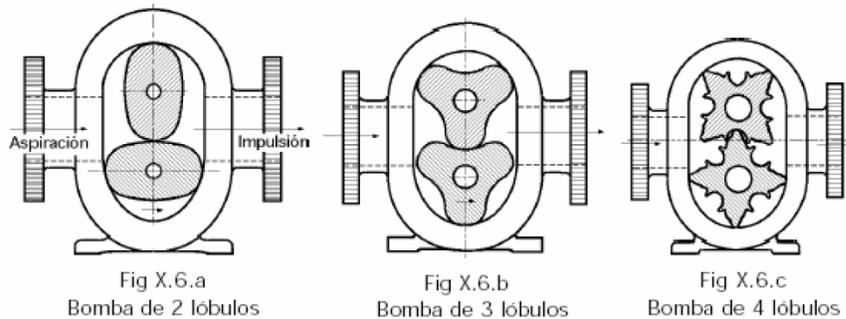


Figura 1.32 Compresor de lóbulos.

Fuentes: EPS. (2005).

Los principales campos de aplicación de los compresores de lóbulos se encuentran en plantas que utilizan transportadores neumáticos para materiales a granel en sistemas de operación al vacío y presión. Los compresores más pequeños se montan en vehículos de acarreo a granel. Los compresores más grandes se emplean en elevadores neumáticos para la descarga de depósitos. Otra aplicación es de frecuente es en los pozos de aireación en las plantas de tratamiento de aguas negras.

### 1.11.5 Compresor de husillo

Compresor de husillo o de tornillo rotatorio tienen una configuración característica, en la carcasa del compresor se encuentran acomodadas dos tornillos con rotación contraria. Las boquillas de admisión y descarga se encuentran localizadas en extremos opuestos. Se producen rotores de tres, cuatro y cinco lóbulos. El par de tornillos sin fin al girar van

comprimiendo el aire atrapado que queda entre ellos. Consiguen alcanzar grandes presiones gracias a lo reducidos de los huelgos existentes entre los tornillos.

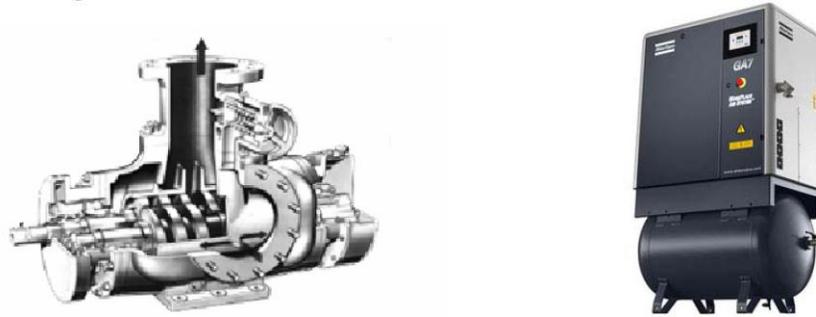


Figura 1.33 Compresor de husillo.

Fuente: EPS. (2005).

El compresor de husillo es una máquina de desplazamiento positivo, por ende, tiene fases de proceso distintivas: succión, compresión y descarga. Estos compresores datan de muchas décadas atrás y casi con seguridad son los compresores que se selecciona para la compresión de aire, tanto libre de aceite como con presencia de aceite, en la minería, construcción, refrigeración, industrial y en un sinnúmero de aplicaciones. Estas máquinas son de igual de adecuadas para la compresión de gases como el amoníaco, argón, etileno, acetileno, butadieno, cloro, gas clorhídrico, gases de tubería natural y sintética, mezclas de gases de antorcha, y muchos otros gases.

### 1.12 Sistema de aire comprimido

Una de las fuentes de energía más utilizadas en las industrias extractivas es el aire comprimido, por lo que es indispensable contar con una óptima red de distribución, con el objeto de que los trabajos se realicen con una alta eficiencia y productividad. Es una energía que presenta algunas ventajas: es fácilmente transportable, es seguro, se lo puede almacenar en depósitos lo que permite que el equipo compresor no esté en continua operación. En la minería se requiere de un importante suministro de aire comprimido, para que abastezca a los diferentes equipos que laboran en interior mina que requieren un considerable esfuerzo tanto físico de operadores como mecánico (perforadoras). Se entiende que la disponibilidad del aire comprimido debe ser permanente, a una presión

adecuada, en cantidades requeridas y con una buena calidad. El aire de la atmósfera es sometido a presiones de hasta 10 bar aproximadamente. (Serrano, 2009)

Un sistema de aire comprimido inadecuado presentará diferentes consecuencias: elevados costos de energía, baja productividad, y un bajo rendimiento en los equipos alimentados. Al presentarse este conflicto, las perforadoras manuales que se utilizan en la pequeña minería tendrán un desgaste de broca, de accesorios y un mayor tiempo de perforación que conduce a la fatiga del personal y productividades bajas. Un sistema de distribución óptimo debe contar con tres requisitos: baja caída de presión entre el compresor y el equipo de consumo, mínima fuga en tuberías de distribución y un drenaje eficiente para los condensados en caso de no instalar un secador de aire comprimido. El diseño del sistema debe cumplir con los requerimientos para una eficiencia, fiabilidad y producción óptima para los equipos de alimentación. (Atlas Copco, 2011)

## CAPÍTULO II

### LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

El levantamiento de información es el primer paso para obtener una idea clara de lo que se puede realizar, tomando en cuenta los parámetros, características y las capacidades de la mina. La identificación del sistema de explotación y la vida útil de la mina serán indispensables para la proyección del diseño óptimo de aire comprimido. El reconocimiento del sistema actual de la mina de aire comprimido nos brinda los parámetros para la optimización o el rediseño del mismo.

#### 2.1 Ficha técnica

Tabla 2.1 Datos generales de la concesión

<b>DATOS GENERALES</b>	
<b>Nombre de la concesión</b>	O – Nivel.
<b>Código</b>	277

Tabla 2.2 Datos de la concesión minera

<b>CONCESIÓN MINERA</b>	
<b>Provincia</b>	El Oro
<b>Cantón</b>	Zaruma
<b>Parroquias</b>	Huertas y Muluncay Grande
<b>Sector</b>	Vía a puente Buza

Tabla 2.3 Sistema de coordenadas UTM para la concesión minera.

<b>SISTEMA COORDENADAS UTM ZONA 17S</b>				
	PSAD 56		WGS 84	
<b>Pto</b>	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas X	Coordenadas Y
<b>PP</b>	651900	9599100	651642	9598727
<b>1</b>	651700	9599100	651442	9598727
<b>2</b>	651700	9599750	651442	9599377
<b>3</b>	651900	9599750	651642	9599377

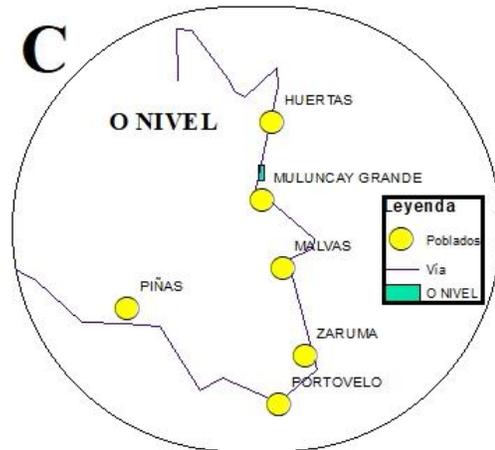
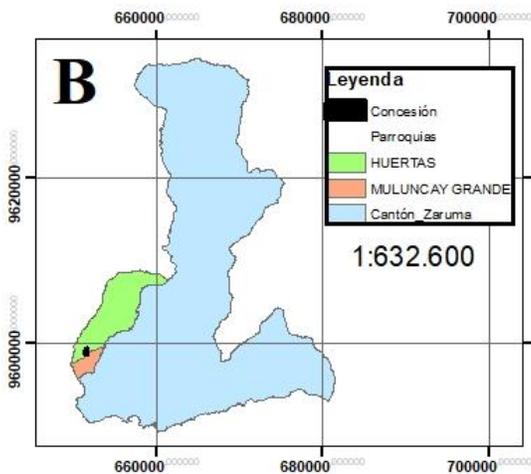
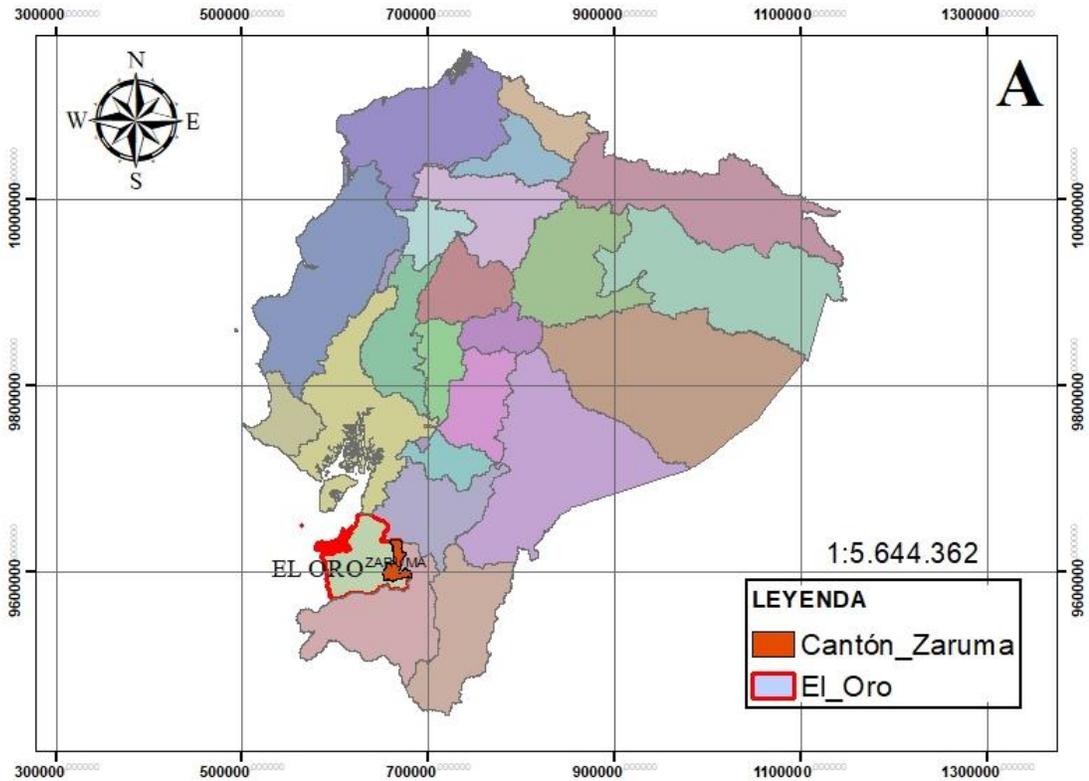
Tabla 2.4 Datos de la concesión minera

<b>DATOS DE LA CONCESIÓN</b>	
<b>Superficie (Ha)</b>	13
<b>Fecha de inscripción</b>	14 de agosto del 2001
<b>Nombre o razón social del titular</b>	Compañía minera ASOPROMIN S.A.
<b>Casillero judicial</b>	772 – Palacio de Justicia de el Oro sede Machala
<b>Domicilio tributario y societario</b>	Calle San Roque. Piñas
<b>Fase del recurso mineral</b>	Exploración y explotación
<b>Representante legal</b>	Ing. Yenner Patricio Apolo Pontón
<b>Tributario de operadoras mineras</b>	Cosme de Jesús Apolo Aguilar
<b>Asesor técnico</b>	Ing. Roque Vicente Maldonado Ramírez
<b>Auditor minero</b>	Ing. Jorge Rolando Alulima Morocho
<b>Tipo de mineral</b>	Metálico Primario: oro Secundario: plata Terciario: roca mineralizada y polisulfuros de Cu.

## 2.1 Ubicación

La Asociación de Producción Minera O-NIVEL se encuentra ubicada en el sitio El Cajón, jurisdicción política de las parroquias Huertas y Muluncay Grande, cantón Zaruma, provincia de El Oro, a 226 km al sureste de la ciudad de Cuenca.

## UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO - O NIVEL



Chaca A.; Pucha C.

Figura 2.1 Mapa de ubicación del área de estudio. A: Ubicación provincial y cantonal. B: Ubicación del área de estudio en las parroquias Huertas y Muluncay. C: Vía Zaruma – Paccha, O NIVEL

Fuente: Autores

# CONCESIÓN MINERA "O NIVEL" CÓDIGO 277

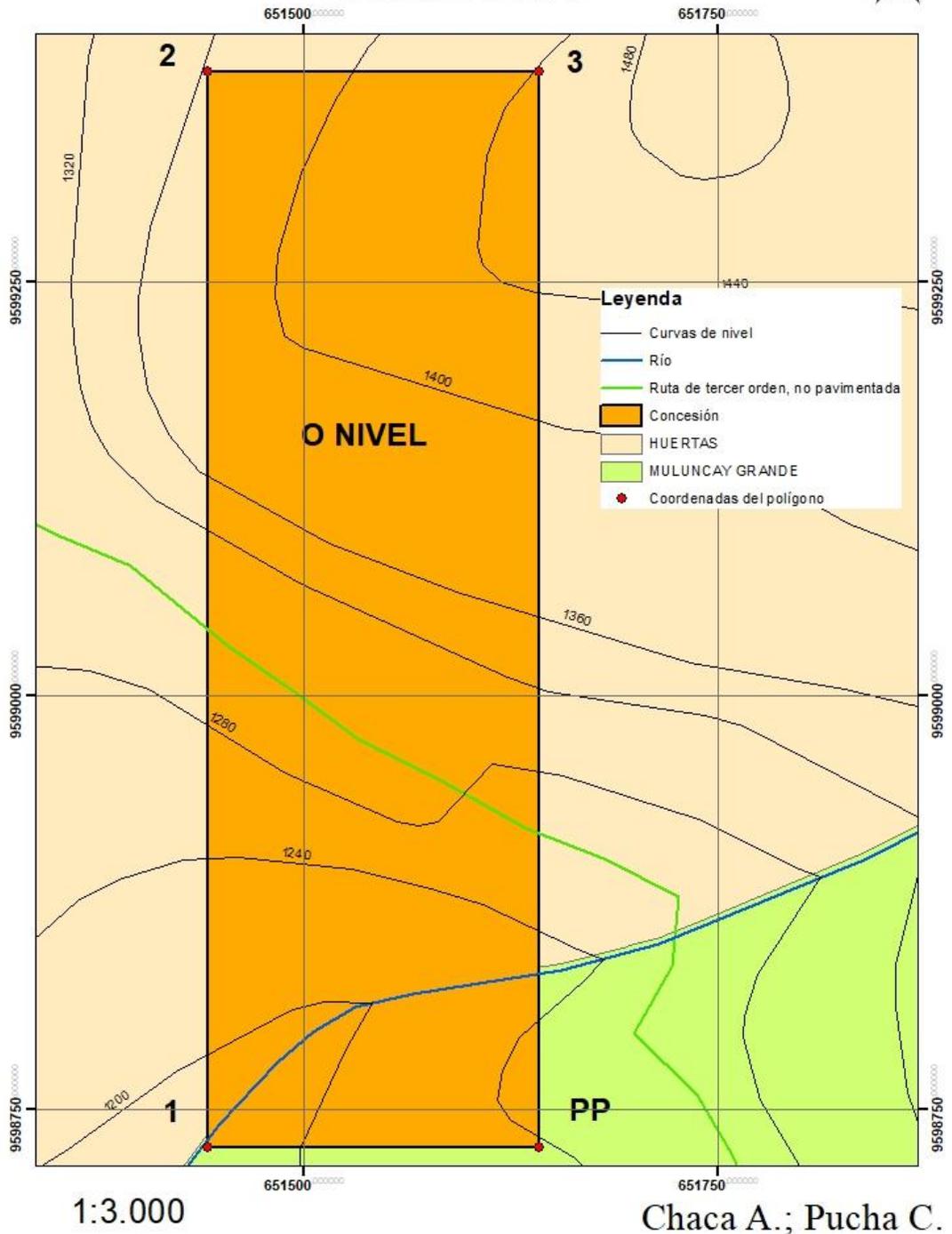


Figura 2.2 Concesión minera "O NIVEL". (Coordenadas WGS84)

Fuente: Autores

## 2.2 Acceso

El acceso a la mina O-NIVEL se lo puede hacer desde la ciudad de Cuenca por vía terrestre con un tiempo de 6 horas aproximadamente, por las siguientes vías de primer orden: Cuenca – Machala, Machala – Zaruma, y continuando luego por la vía Zaruma – Paccha, hasta la parroquia Muluncay, de este sector se desvía hasta llegar al sitio El Cajón perteneciente a la parroquia Huertas y Muluncay Grande, a 15 minutos de Muluncay, este tramo corresponde a una vía de tercer orden.

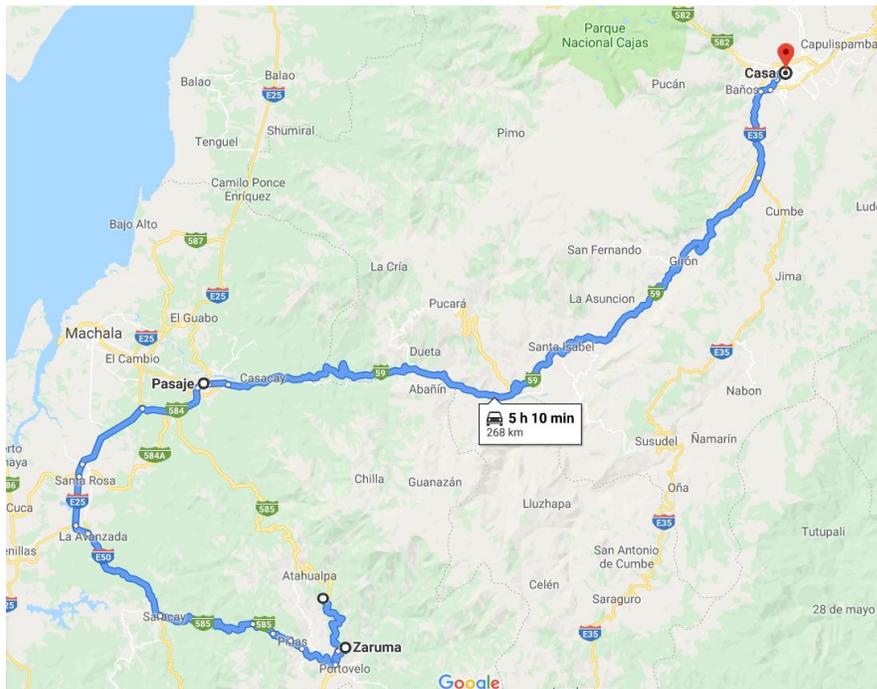


Figura 2.3 Acceso a la mina

Fuente: Google Maps

La segunda alternativa desde la ciudad de Cuenca para llegar a la mina O-NIVEL se lo puede hacer por vía terrestre con un tiempo de 5 horas y media aproximadamente, por las siguientes vías de primer orden: Cuenca – Pasaje, Pasaje – Paccha, hasta llegar a la parroquia Muluncay, y continuar con el tramo de la vía de tercer orden.

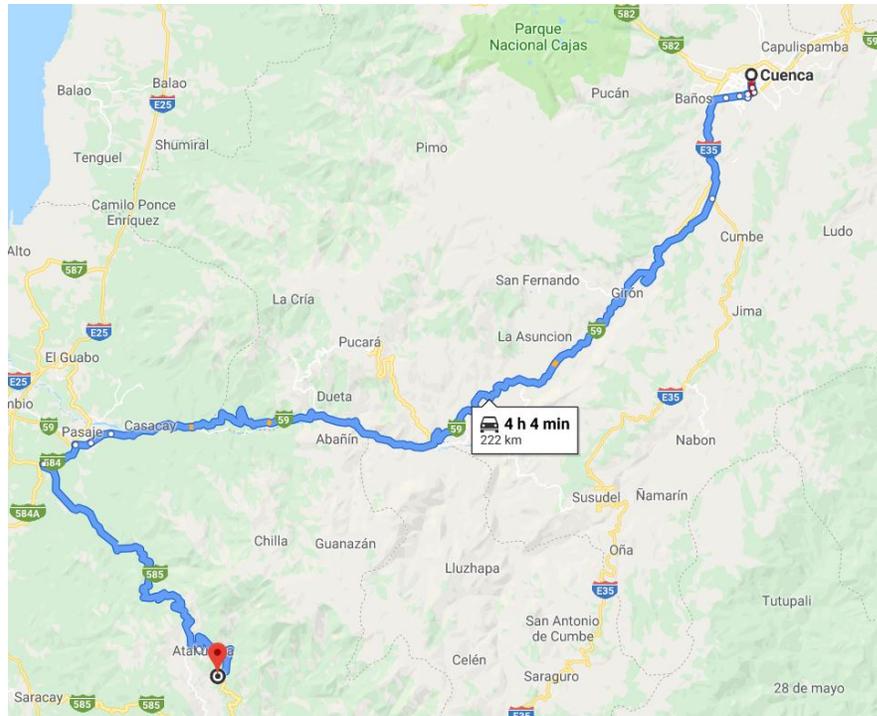


Figura 2.4 Acceso a la mina, segunda alternativa

Fuente: Google maps

## 2.3 Recursos naturales

### 2.3.1 Clima

En la zona de la parroquia Huertas y Muluncay grande predomina un clima húmedo y subtropical con temperaturas que oscilan entre 15 y 31°C. Los periodos de invierno comienzan en los meses de diciembre y termina en mayo; además con presencia de fuertes lluvias en los meses de febrero a abril, la cantidad de lluvia anual promedio es de 1330 mm. En los meses de julio a noviembre predomina un clima seco, pero con temperaturas frías en los meses de julio a septiembre, acompañado de vientos fuertes.

### 2.3.2 Flora

La zona se caracteriza por tener una vegetación tipo bosque en casi todo el territorio. Los suelos son muy productivos y se realiza la siembra de diversas especies forestales, entre los cuales se destacan plantaciones de guayabo, maní, café; sin embargo, la minería es una actividad que está reemplazando a la agricultura.

Dentro del área minera existen remanentes de vegetación de tipo arbóreos, arbustivos y herbáceos nativos.

### 2.3.3 Fauna

Alrededor de la zona minera existe abundante bosque, quebradas y huertas, lo que ocasiona la presencia de 24 familias y 46 especies de aves, además es común encontrar pequeñas bandadas de loras en estos sitios. El ambiente favorece a la presencia de algunas serpientes, lagartijas e iguanas.

### 2.4 Geología regional

El distrito minero de Portovelo – Zaruma se encuentra en la prolongación noroeste de la provincial de El Oro; situada en la parte suroccidental que ocupa parte de la cordillera Real y de la cordillera Occidental.

La hoja de Santa Rosa está ubicada en la provincia de El Oro, en el suroeste del Ecuador, comprende basamento metamórfico y el volcanismo terciario de arco continental. Este basamento metamórfico está cubierto discordantemente por el volcanismo continental calcoalcalino, representado por rocas del Grupo Saraguro del Oligoceno tardío al Mioceno temprano y volcánico recientes. (INIGEMM, 2017)

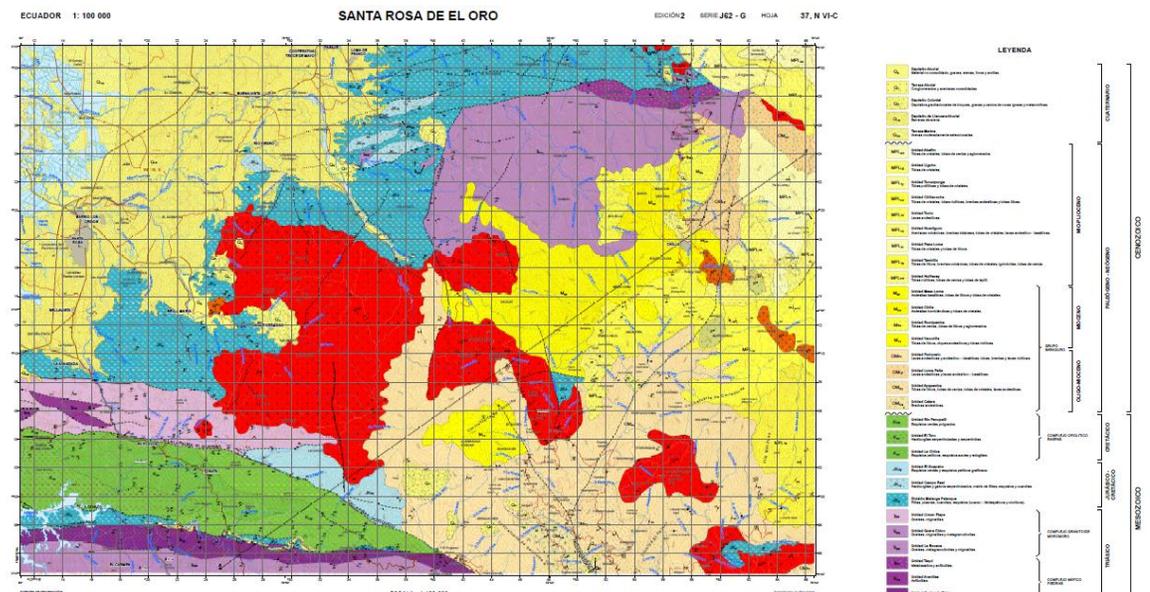


Figura 2.5 Mapa Geológico del Ecuador Escala 1 : 100 000. Hoja Geológica de Santa Rosa.

Fuente: INIGEMM 2017

Tabla 2.5 Geología regional para ubicación de la mina O Nivel.

<b>FORMACIÓN GEOLÓGICA</b>		<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>ETAPA</b>	<b>FORMACIÓN</b>	
<b>CUATERNARIO</b>	Depósito aluvial	Material no consolidado, gravas, arenas, limos y arcillas
	Terraza aluvial	Conglomerados y areniscas consolidadas.
	Depósito Coluvial	Depósitos gravitacionales de bloques, gravas y cantos de rocas ígneas y metamórficas
	Depósito de llanura aluvial	Barreras de arena.
	Depósito marina	Arena moderadamente seleccionada.
<b>PALEÓGENO - NEÓGENO</b>	Unidad Abañiñ	Tobas de cristales.
	Unidad Lligcho	Tobas de cristales.
	Unidad Tununyunga	Tobas polilíticas y tobas de cristales.
	Unidad Chillacocha	Tobas de cristales, tobas riolíticas, brechas andesíticas y tobas líticas.
	Unidad Tuctu	Lavas andesíticas.
	Unidad Huartiguro	Areniscas volcánicas, brechas tectónicas, tobas de cristales, lavas andesítico – basálticas.
	Unidad Pasa Loma	Tobas de cristales y tobas de líticos.
	Unidad Tambillo	Tobas de líticos, brechas volcánicas, tobas de cristales, ignimbritas, tobas de ceniza.
	Unidad Huiñacay	Tobas riolíticas, tobas de ceniza y tobas de cristales.
	Unidad Mesa Loma	Andesitas basálticas, tobas de líticos y tobas de cristales.
<b>CENOZOICO</b>	Unidad Chilla	Andesitas hornbléndicas y tobas de cristales.
	Unidad Rumipamba	Tobas de ceniza, tobas de líticos y aglomerados.
	Unidad Yacuviña	Tobas de líticos, diques andesíticos y tobas riolíticas.
	Unidad Portovelo	Lavas andesíticas y andesítico – basálticas, tobas, brechas y lavas riolíticas.
	Unidad de Loma Palta	Lavas andesíticas y lavas andesítico – basálticas.

<b>MESOZOICO</b>	Unidad Ayapamba	Tobas de líticos, tobas de ceniza, tobas de cristales, lavas andesíticas.
	Unidad Calera	Brechas andesíticas.
	Unidad Río Panupallí	Esquistos verdes prógrados.
	Unidad El Toro	Harzburgitas serpentinizadas y serpentinitas.
	Unidad La Chilca	Esquistos pelíticos, esquistos azules y ecloglitas.
	Unidad El Guayabo	Esquistos verdes y esquistos pelíticos grafitosos.
	Unidad Campo Real	Harzburgitas y grabos serpentinizados, matriz de filitas, esquistos y cuarcitas.
	División Melange Palenque	Filitas, pizarras, cuarcitas, esquistos (cuarzo – feldespáticos y cloríticos).
	Unidad Limon Playa	Gneises, migmatitas y metagranodioritas.
	Unidad Quera Chico	Gneises, migmatitas y metagranodioritas.
	Unidad La Bocana	Gneises, metagranodioritas y migmatitas.
	Unidad Taqui	Metabasaltos y anfibolitas.
	Unidad Arenillas	Anfibolitas.
	Unidad Quebrada Plata	Anfibolitas y esquistos verdes (anfibolitas retrógradas).

La Geología Regional fue tomada de: INIGEMM (2017), Memoria Técnica de la Hoja Geológica Santa Rosa, Quito, Ecuador.

## 2.5 Geología local

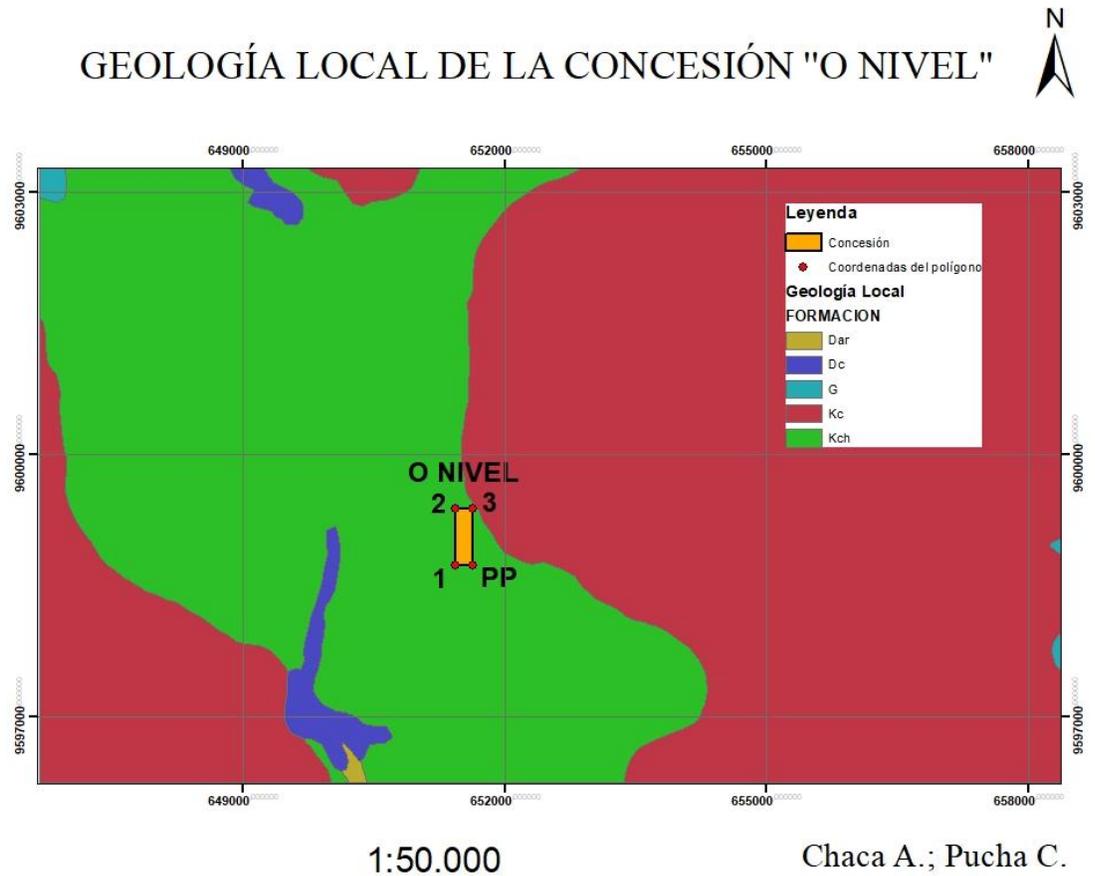


Figura 2.6 Mapa de geología local de la concesión O NIVEL.

Fuente: Autores

Tabla 2.6 Geología local de la concesión O Nivel.

<b>Formación</b>	<b>Descripción</b>
<b>Dar</b>	Depósito coluvial: Depósitos gravitacionales de bloques, gravas y cantos de rocas ígneas y metamórficas.
<b>Dc</b>	Brechas andesíticas
<b>G</b>	Granodiorita
<b>Kc</b>	Unidad Portovelo: Lavas andesíticas y andesítico – basálticas, tobas, brechas y lavas riolíticas.
<b>Kch</b>	Unidad Ayapamba: Tobas de líticos, tobas de ceniza, tobas de cristales, lavas andesíticas.

### **Unidad Portovelo**

La Unidad Portovelo ésta constituido por varios tipos de roca como: la granodiorita, andesita, la monzonita, el filón. En este grupo de rocas es donde ocurren las mineralizaciones de oro, plata, cobre, plomo y zinc. Se trata de lavas andesíticas de color gris, con fenocristales de hornblenda y plagioclasa. La meteorización de esta unidad origina un suelo de color rojizo.

En las rocas volcánicas andesíticas y dacíticas está emplazado un tren estructural de vetas de cuarzo-auríferas, mezo y epitermales, el cual tiene una dirección predominante norte – sur, con una extensión de 15 km de largo por 2 km de ancho, de Franja mineralizada y, una profundidad de 1400 m; desarrollado en un ambiente de arco de islas a continental, calco-alcalino, del cual forma parte las vetas que se explotan en el Área minera O NIVEL.

La veta Jenn forma es una Veta Tipo A que forma parte de las vetas mineralizadas están controladas por un sistema de Fallas norte –sur, tienen buzamiento al Este, desde los 60° hasta casi verticales en profundidad, con espesores que van de los 0.20 m hasta los 2 metros, tiene una mineralización característica de blenda, esfalerita, galena, pirita, calcopirita,

La veta Cristina forma es una veta tipo B que forma parte de las vetas mineralizadas están controladas por un sistema de Fallas norte –sur, tienen buzamiento al Este, desde los 60° hasta casi verticales en profundidad, con espesores que van de los 0.20 m hasta los 2 metros, tiene una mineralización característica, pirita, calcopirita, magnetita.

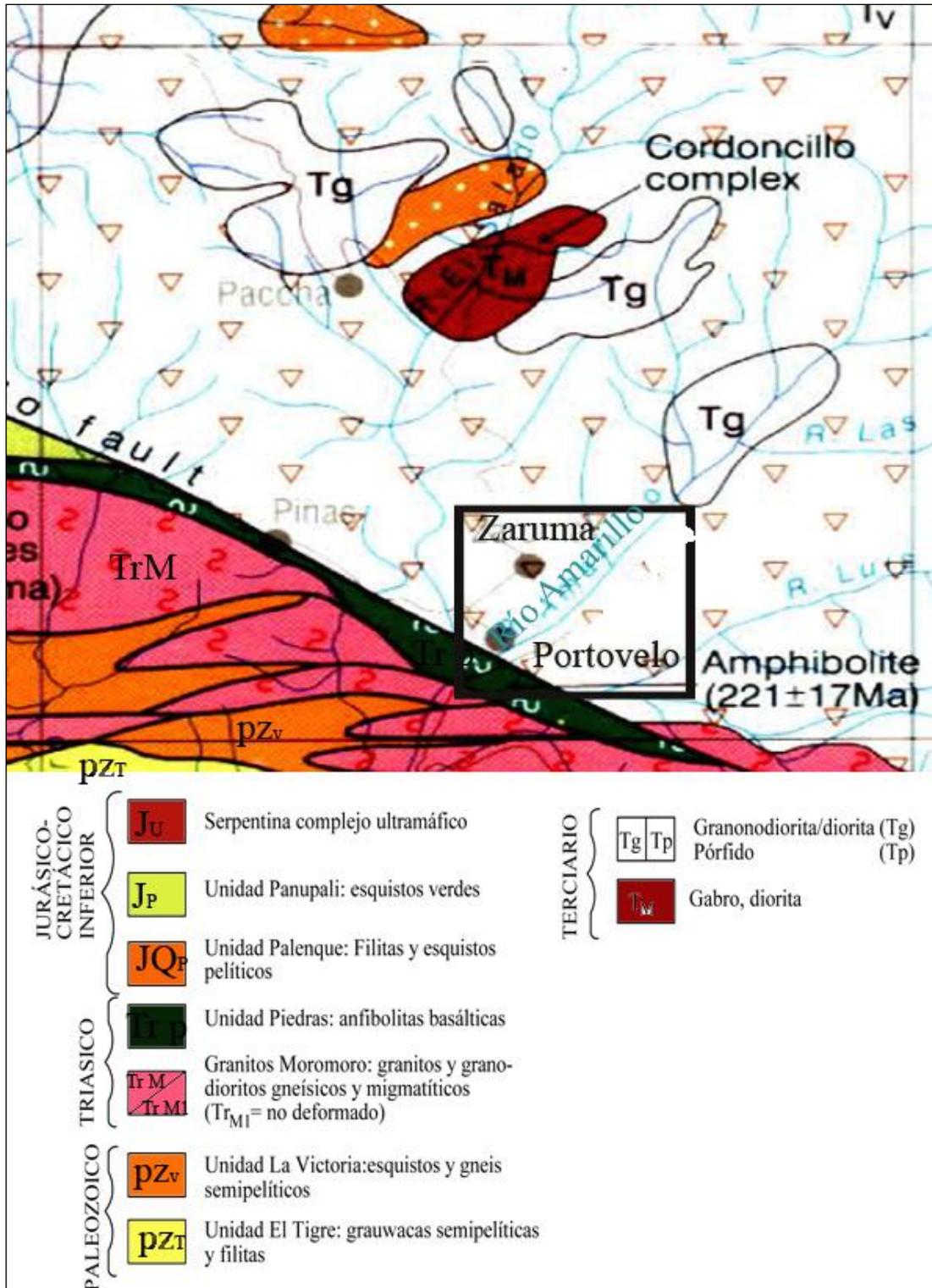


Figura 2.7 Geología del Distrito Minero Portovelo - Zaruma a Escala 1:1 000000.

Fuente: Mapa Geológico del Ecuador 1994)

## 2.6 Minerales, mena, ganga

Las vetas que atraviesan por el área minera O NIVEL están constituidas por el 80% cuarzo y 20% de calcita, el espesor varía dependiendo de la unión de sus ramificaciones que va de 0.60m hasta 1.5m, esto caracteriza a la veta por formar estructuras tipo cola de caballo, además las vetas tienen un Azimut norte - sur con buzamiento al este que varía de 50° en zonas cercanas a la superficie y mayor a 70° hasta subverticales en la zona primaria.

En la zona lixiviada las vetas se encuentran totalmente oxidadas con presencia de óxidos de hierro, el cuarzo por la lixiviación de los sulfuros presenta pequeñas agujeraciones.

En la Zona mixta: está constituida por óxidos de hierro, calcosina cobelina, enargita, y pocas cantidades de sulfuros primarios

En la Zona Primaria podemos encontrar los siguientes sulfuros como: pirita, calcopirita, galena

La ley de oro está estrictamente relacionada con las zonas de mineralización, siendo así la zona lixiviada las zonas con mayor contenido, además se estrecha con la presencia de contenido de sulfuros de Zinc en las zonas primarias, la ley de corte está entre 4 a 12 ppm.

Las alteraciones hidrotermales características para este tipo de yacimientos: argilitización, cloritización, piritización intensas y, cuarzo, sercicitación-adularia.

## 2.7 Estructuras

Se tiene dos fallas mineralizadas importantes, las cuales forman las vetas Jenn y Cristina, con buzamientos variables entre los 65° a 85° hacia el este. La mineralización está definida por dos estructuras diferenciadas por su contenido mineral.

La veta Cristina presenta el siguiente ensamblaje de mineralización esfalerita-blenda-pirita diseminada y un microvetilleo de calcopirita.

La veta Jenn, contiene un ensamblaje de calcopirita – pirita- magnetita y gran cantidad de cuarzo mineralizado. Su corrida es en dirección norte a sur, con buzamiento de 70° a 75° al este.

## 2.8 Reservas mineras

El cálculo de reservas se lo realiza mediante perfiles de producción, consiste en dibujar el banco de explotación para luego calcular su área por el espesor de la veta logramos encontrar el volumen de producción conociendo que la densidad promedio para este tipo vetas es 2.5 encontramos el tonelaje para producción.

$$\text{Tonelaje} = A \times e \times d \quad (43)$$

A = Área de la sección

e = espesor o potencia de la Veta

d = densidad o gravedad específica de la Veta

Tabla 2.7 Reservas mineras del área

<b>Reporte de Reservas Mineras del Área O Nivel</b>		
<b>SOCIEDAD MINERA</b>	<b>PROBABLES</b>	<b>PROBADAS</b>
Cosme Apolo	400 ton	220 ton
José Carrión	750 ton	150 ton
<b>Total</b>	<b>1150 ton</b>	<b>370 ton</b>

## 2.9 Operaciones mineras

Las labores de exploración y explotación se realizan a través de un sistema perforación manual, el sistema de explotación varía de acuerdo a las características de la veta. El transporte de material se lo realiza por medio de vagones impulsados por una locomotora eléctrica.

La mina tiene una producción diaria de 60 toneladas aproximadamente, las labores mineras son: 30 días en el mes teniendo dos turnos por día de 8 horas (correspondiendo a cada turno).

### 2.9.1 Exploración

La exploración se lo realiza a través de la construcción continua de galerías por las diferentes vetas, para localizar zonas de valor y luego colocar de forma inmediata buzones

de extracción de mineral, de acuerdo a los resultados visuales obtenidos mediante el método de la batea.

### **2.9.2 Desarrollo y preparación**

Después de comprobar reservas susceptibles a ser explotadas, se procede a construir las infraestructuras necesarias para la extracción del mineral (labores de desarrollo), tales como vías de acceso, vías de extracción, servicios auxiliares. Estas pueden ser comúnmente galerías, chimeneas, cruceros, piques y socavones.

Para la preparación del mineral se realizan subniveles y chimeneas que conforman los llamados “bloques de explotación” mediante una secuencia ascendente serán perforados y luego tronados. Arrancado el material se permite su transporte hacia el stock. La preparación consiste delimitación de bloques para su posterior explotación, mediante la apertura de diferentes labores mineras como son: galerías de exploración, cruceros corta vetas, pozos o piques, rebajes inclinados, chimeneas de ventilación. De la misma manera se procede a la instalación de diferentes infraestructuras para el trabajo como son: buzones de trasiego, plataformas para estaciones de winches, redondeles de locomotora, etc.

### **2.10 Secuencia de avance**

El sistema de explotación es subterráneo el método de explotación es definido por niveles cada 30 m, tomados desde la superficie, cota 1084 msnm. El minado se realiza empleando el método de corte y relleno, con algunas modificaciones. Los trabajos actuales se desarrollan desde el nivel -O de forma ascendente y descendente, con respecto al bombeo. El nivel freático se encuentra debajo del nivel -O.

### **2.11 Método de explotación**

#### **Corte y relleno ascendente**

En este método de explotación el mineral es cortado en tajadas horizontales, comenzando de la parte baja y avanzando hacia arriba. El mineral roto es cargado y extraído completamente del tajo. Cuando se ha excavado una tajada completa, el vacío dejado se rellena con material exógeno que permite sostener las paredes y sirve como piso de trabajo para el arranque y extracción de la tajada siguiente. Como relleno, se utiliza el material

estéril proveniente de los desarrollos subterráneos o de la superficie, e incluso, mezclas pobres de material particulado y cemento para darle mayor resistencia.

Después de las labores de preparación se empieza a la rotura del tajeo a partir de subnivel, sacando el corte en la parte central del tajeo con la finalidad de mantener el ciclo siguiente: Perforación, voladura, ventilación, limpieza y relleno.

### **Características del método**

La explotación de corte y relleno puede utilizarse en yacimientos que presenten las siguientes características.

- Fuerte buzamiento, superior a los 50 de inclinación.
- Potencia moderada.
- Límites regulares del yacimiento.

### **Ventajas del método**

- Recuperación del mineral casi en un 100%.
- Es un método selectivo.
- Puede llegar a alcanzar alto grado de mecanización.
- Es un método seguro para los trabajadores.
- El método puede adecuarse al yacimiento con propiedades físicas y mecánicas incompetentes

## **2.12 Almacenamiento del mineral**

Posteriormente a la perforación y tronadura, el material de interés es trasladado hacia los buzones de los distintos tajos para ser cargados en los vagones. El material de interés es trasladado hacia el exterior de la mina, en donde es depositado en stock. El material es seleccionado (disminuyendo la dilución del material), separando el material de interés con la ganga, este material es desechado y el mineral de interés es depositado en buzones de almacenamiento, para su posterior transporte a la planta de tratamiento.

### 2.13 Sistema actual de distribución de aire comprimido

El sistema actual de aire comprimido resulta ineficiente, ya que el sistema se ha ido adaptando a los avances mineros y no ha sido actualizado u optimizado. Tanto como la tubería y los accesorios deben ser cambiados y obtener una red de aire más adecuada.

El sistema actual consta:

- Un compresor de tornillo KAESER CSD 125.
- Tubería de 2 pulgadas de diámetro de polietileno.
- Tubería de 1 pulgada de diámetro para distribución a las perforadoras.

Compresor



Fuente: Catálogo Kaeser Compresores de tornillo. Serie CSD / CSDX

Ficha técnica

**Datos técnicos – CSD**

Versión básica

Modelo	Presión de trabajo bar	Caudal* equipo completo a la presión de trabajo m³/min	Presión máxima de trabajo bar	Pot. nominal del motor kW	Dimensiones L x A x A mm	Conexión de aire comprimido	Nivel de presión sonora ** dB(A)	Peso kg
CSD 85	7,5	8,26	8,5	45	1760 x 1110 x 1900	G 2	70	1250
	10	6,89	12					
	13	5,50	15					
CSD 105	7,5	10,14	8,5	55	1760 x 1110 x 1900	G 2	71	1290
	10	8,18	12					
	13	6,74	15					
CSD 125	7,5	12,02	8,5	75	1760 x 1110 x 1900	G 2	72	1320
	10	10,04	12					
	13	8,06	15					







Fuente: Catálogo Kaeser Compresores de tornillo. Serie CSD / CSDX

## CAPITULO III

### DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

#### 3.1 Recolección de datos

##### 3.1.1 Distancias de los ramales

Para un adecuado diseño es necesario contar con las características topográficas de la mina, por ende, hay que tener a detalle:

- El plan de minado o las reservas y las proyecciones de la mina (la mina no cuenta con un plan de minado, esto se debe a que es un proyecto de aprovechamiento de una mina antigua y a pequeña escala). Por este motivo, el presente trabajo se lo ha realizado en función del avance en la producción que ha tenido la mina durante los años precedentes.
- La topografía a escala, en donde se pueda detallar todas las labores e infraestructura de la mina, ubicación y localización de equipos y accesorios.

En base a esto se detalla el siguiente cuadro.

Tabla 3.1 Longitudes de ramales

<b>Nro.</b>	<b>Nivel</b>	<b>Veta</b>	<b>Descrip.</b>	<b>Long. Real Horizontal (ft)</b>	<b>Long. Real Vertical (ft)</b>
1	O	Acceso A	Socavón	1002.59	
2	O	Preventora Norte	Frontón	77.85	
3	O	Preventora Sur	Frontón	59.68	
4	O	Acceso B	Socavón	869.75	
5	O	Vetilla Sur	Frontón	81.43	
6	O	Acceso C	Socavón	535.30	
7	O	X Norte	Frontón	44.29	
8	O	X Sur	Frontón	305.05	

<b>9</b>	O	Acceso D	Socavón	157.35
<b>10</b>	O	Cristina Sur - A	Frontón	665.50
<b>11</b>	O	CPA P1	Crucero	121.65
<b>12</b>	O	Cristina Sur -B	Frontón	389.40
<b>13</b>	O	CGE	Crucero	86.45
<b>14</b>	O	Cristina Sur - C	Frontón	130.31
<b>15</b>	O	Cristina Sur - C A	Frontón	376.28
<b>16</b>	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	344.36
<b>17</b>	O	Acceso E	Socavón	115.85
<b>18</b>	O	Jenn Norte	Frontón	114.83
<b>19</b>	O	Jenn Sur	Frontón	161.48
<b>20</b>	P	Cristina Sur	Chimenea	134.51
<b>21</b>	P	Cristina Sur	Crucero	96.49
<b>22</b>	P	Cristina Sur - A	Frontón	1299.05
<b>23</b>	Q	Cristina Sur	Chimenea	134.51
<b>24</b>	Q	Cristina Sur	Frontón	1536.81
<b>25</b>	Q	Cristina Sur B	Crucero	180.71
<b>26</b>	R	Cristina Sur	Chimenea	52.49
<b>27</b>	R	Cristina Sur B	Crucero	214.90
<b>28</b>	R	Cristina Sur	Frontón	637.76
<b>29</b>	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	95.14
<b>30</b>	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	242.88
<b>31</b>	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	1310.73
<b>32</b>	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	97.60
<b>33</b>	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	167.36
<b>34</b>	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	13.12
<b>35</b>	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	397.31
<b>36</b>	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	62.34
<b>37</b>	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	391.08
<b>38</b>	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	135.10

### 3.1.2 Características técnicas de las máquinas perforadoras neumáticas

Las características de obtuvo a partir del catálogo del fabricante en donde se detalla la ficha técnica. La mayoría de fabricantes definen el volumen estándar de aire libre como 1 ft<sup>3</sup> a 60 °F, 14.7 psi y 0 % de humedad relativa. El caudal esta expresado en cfm (cfm es igual 1 ft<sup>3</sup> en cualquier condición).

La red de aire comprimido está proyectada para el consumo máquinas perforadoras rotopercutivas de marca china YT27, se detalla la ficha técnica:

Tabla 3.2 Ficha técnica de perforadora YT27

Ficha Técnica		Embolo y Lubricador	
Peso	27 kg	Frecuencia de Impacto	37 ~ 40 Hz
Largo x Ancho x Alto	668x248x202 mm	Energía Impacto	50 ~ 70 J
Consumo de aire	50 ~ 85 L/s	Presión de Trabajo	0.4 ~ 0.63 MPa
Ø Manguera de aire	25 mm	Presión hidráulica	0.3 MPa
Ø Manguera de agua	13 mm	Torque	13 ~ 19 Nm
Ø de cilindro	80 mm	Ø apropiado de orificio	34 ~ 45 mm
Carrera de Piston	60 mm	Profundidad de Perforación	5 Mts
Velocidad Perforación	300 ~ 480 mm/min	Vastago	H22x108 mm

Los requerimientos de consumo de aire de la máquina perforadora son 176 cfm y la presión de trabajo es 91.4 psi.



Figura 3.1 Perforadora neumática China YT27

### 3.1.3 Presión atmosférica a la altitud de la mina

La presión atmosférica es la presión que ejerce el aire sobre la tierra, en un punto cualquiera coincide numéricamente con el peso de una columna estática de aire de sección recta unitaria que se extiende desde ese punto hasta el límite superior de la atmósfera. La temperatura como la presión del aire están variando continuamente, tanto en una escala temporal como espacial. Se presenta un cuadro con mediciones de la presión atmosférica de acuerdo a la altitud.

Tabla 3.3 Presión Atmosférica en Función de la Altitud

Altitude Above Sea Level		Absolute Barometer		Absolute Atmospheric Pressure		
feet	metre	inches Hg	mm Hg	psia	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
<b>-5000</b>	-1524	35.7	908	17.5	1.23	121
<b>-4500</b>	-1372	35.1	892	17.2	1.21	119
<b>-4000</b>	-1219	34.5	876	16.9	1.19	117
<b>-3500</b>	-1067	33.9	861	16.6	1.17	115
<b>-3000</b>	-914	33.3	846	16.4	1.15	113
<b>-2500</b>	-762	32.7	831	16.1	1.13	111
<b>-2000</b>	-610	32.1	816	15.8	1.11	109
<b>-1500</b>	-457	31.6	802	15.5	1.09	107
<b>-1000</b>	-305	31	788	15.2	1.07	105
<b>-500</b>	-152	30.5	774	15	1.05	103
<b>0</b>	0	29.9	760	14.7	1.03	101
<b>500</b>	152	29.4	746	14.4	1.01	99.5
<b>1000</b>	305	28.9	733	14.2	0.997	97.7
<b>1500</b>	457	28.3	720	13.9	0.979	96
<b>2000</b>	610	27.8	707	13.7	0.961	94.2
<b>2500</b>	762	27.3	694	13.4	0.943	92.5
<b>3000</b>	914	26.8	681	13.2	0.926	90.8
<b>3500</b>	1067	26.3	669	12.9	0.909	89.1
<b>4000</b>	1219	25.8	656	12.7	0.893	87.5
<b>4500</b>	1372	25.4	644	12.5	0.876	85.9
<b>5000</b>	1524	24.9	632	12.2	0.86	84.3
<b>6000</b>	1829	24	609	11.8	0.828	81.2
<b>7000</b>	2134	23.1	586	11.3	0.797	78.2
<b>8000</b>	2438	22.2	564	10.9	0.768	75.3
<b>9000</b>	2743	21.4	543	10.5	0.739	72.4
<b>10000</b>	3048	20.6	523	10.1	0.711	69.7
<b>15000</b>	4572	16.9	429	8.29	0.583	57.2

<b>20000</b>	6096	13.8	349	6.75	0.475	46.6
<b>25000</b>	7620	11.1	282	5.45	0.384	37.6
<b>30000</b>	9144	8.89	226	4.36	0.307	30.1
<b>35000</b>	10668	7.04	179	3.46	0.243	23.8
<b>40000</b>	12192	5.52	140	2.71	0.191	18.7
<b>45000</b>	13716	4.28	109	2.1	0.148	14.5
<b>50000</b>	15240	3.27	83	1.61	0.113	11.1

Se tiene la siguiente ecuación para el cálculo de la presión atmosférica en función de la altitud:

$$P_e = 101\,325 (1 - 2.25577 \times 10^{-5} \times z)^{5.25588}$$

Donde z corresponde al valor de la altitud de la boca mina de O NIVEL

$$z = 1085 \text{ msnm}$$

$$P_e = 101\,325 (1 - 2.25577 \times 10^{-5} \times 1085)^{5.25588}$$

$$P_e = 88952.16 \text{ Pa}$$

Si se observa la tabla 6, se puede comprobar el valor de Pe para tener un resultado óptimo.

Transformamos el resultado de Pe a unidades de psi

$$P_e = 12.9 \text{ psi}$$

### 3.1.4 Cálculo de las longitudes equivalentes para accesorios

De acuerdo a lo visto en el capítulo 1, en el tema Flujo de fluidos en válvulas y accesorios, se definió la ecuación (39) para el coeficiente de resistencia K:

$$K = f \frac{L}{D}$$

#### 3.1.4.1 Válvulas de compuerta

El diámetro de entrada debe ser igual al diámetro de salida, entonces  $\beta = 1$ ,  $\theta = 0^\circ$  y la fórmula para utilizarla es:

$$K_1 = 8 f_T$$

Igualando la ecuación con la ecuación (39):

$$K_1 = K$$

$$8 f_T = f \left( \frac{L}{D} \right)$$

$$8 = \frac{L}{D}$$

- Válvula de compuerta de 5''

$$L = 8 \times \frac{5.51 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 3.673 \text{ ft}$$

- Válvula de compuerta de 4''

$$L = 8 \times \frac{4.33 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 2.887 \text{ ft}$$

Válvula de compuerta de 3''

$$L = 8 \times \frac{3.54 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 2.36 \text{ ft}$$

- Válvula de compuerta de 2''

$$L = 8 \times \frac{2.48 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 1.653 \text{ ft}$$

### 3.1.4.2 Codo de 90°

$$K = 30 f_T$$

Igualando ésta ecuación con la ecuación (39):

$$30 f_T = f \left( \frac{L}{D} \right)$$

$$30 = \frac{L}{D}$$

- Codo de 90° de 5''

$$L = 30 \times \frac{5.51 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 13.775 \text{ ft}$$

- Codo de 90° de 4''

$$L = 30 \times \frac{4.33 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 10.825 \text{ ft}$$

- Codo de 90° de 3''

$$L = 30 \times \frac{3.54 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 8.85 \text{ ft}$$

- Codo de 90° de 2''

$$L = 30 \times \frac{2.48 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 6.2 \text{ ft}$$

### 3.1.4.3 Tee

$$K = 20 f_T$$

Igualando ésta ecuación con la ecuación (39):

$$20 f_T = f \left( \frac{L}{D} \right)$$

$$20 = \frac{L}{D}$$

- Tee de 5''

$$L = 20 \times \frac{5.51 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 9.183 \text{ ft}$$

- Tee de 4''

$$L = 20 \times \frac{4.33 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 7.217 \text{ ft}$$

- Tee de 3''

$$L = 20 \times \frac{3.54 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 5.9 \text{ ft}$$

- Tee de 2''

$$L = 20 \times \frac{2.48 \text{ in}}{12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}$$

$$L = 4.133 \text{ ft}$$

#### 3.1.4.4 Reducciones

$$K_1 = 0.5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right)$$

Donde  $d_1$ : diámetro de tubería pequeña

$d_2$ : diámetro de tubería grande

Los factores de fricción ( $f$ ) según los diámetros son:

- 5''  $f$ : 0.016
- 4''  $f$ : 0.017
- 3''  $f$ : 0.018
- 2''  $f$ : 0.019
- 1''  $f$ : 0.023

Igualando ésta ecuación con la ecuación (39):

$$0.5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) = f \left( \frac{L}{D} \right)$$

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \left( \frac{D}{f} \right)$$

- Reducción de 5'' a 4''

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{4.33^2}{5.51^2} \right) \left( \frac{4.33 \text{ in}/12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}{0.017} \right)$$

$$L = 4.059 \text{ ft}$$

- Reducción de 5'' a 3''

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{3.54^2}{5.51^2} \right) \left( \frac{3.54 \text{ in}/12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}{0.018} \right)$$

$$L = 4.812 \text{ ft}$$

- Reducción de 4'' a 3''

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{3.54^2}{4.33^2} \right) \left( \frac{3.54 \text{ in}/12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}{0.018} \right)$$

$$L = 2.717 \text{ ft}$$

- Reducción de 4'' a 2''

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{2.48^2}{4.33^2} \right) \left( \frac{2.48 \text{ in}/12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}{0.019} \right)$$

$$L = 3.655 \text{ ft}$$

- Reducción de 3'' a 2''

$$L = 0.5 \left( 1 - \frac{2.48^2}{3.54^2} \right) \left( \frac{2.48 \text{ in}/12 \left( \frac{\text{in}}{\text{ft}} \right)}{0.019} \right)$$

$$L = 3.655 \text{ ft}$$

De acuerdo a lo anterior se tiene un cuadro resumen de los cálculos realizados:

Tabla 3.4 Longitudes equivalentes para accesorios

Leyenda	Descripción	Diámetros				
		140 mm 5"	110 mm 4"	90 mm 3"	63 mm 2"	32 mm 1"
<b>vc</b>	Válvula compuerta	3.673	2.887	2.36	1.653	1.067
<b>c90°</b>	Codo 90°	13.775	10.825	8.85	6.2	4
<b>c45°</b>	Codo 45°	7.347	5.773	4.720	3.307	2.133
<b>t</b>	Tee	9.183	7.217	5.900	4.133	2.667
<b>r54</b>	Reducción 5" a 4"		4.059			
<b>r53</b>	Reducción 5" a 3"			4.812		
<b>r43</b>	Reducción 4" a 3"			2.717		
<b>r42</b>	Reducción 4" a 2"				3.655	
<b>r32</b>	Reducción 3" a 2"				2.769	

## 3.2 Análisis de datos

### 3.2.1 Requerimientos de las máquinas perforadoras

Ya se definió el consumo de la máquina perforadora es: 176 cfm y la presión de trabajo es 91.4 psi, pero para determinar el consumo real es necesario multiplicar por ciertos factores de corrección o en otros términos ajustar los requerimientos.

### 3.2.2 Ajuste por consumo de altitud (F<sub>1</sub>)

Los requerimientos de las maquinas dadas por el fabricante están dadas para condiciones estándar (0 m.s.n.m y a 14 psi de presión), entonces es necesario ajustar a las condiciones de altura de la mina.

#### Ecuación ajuste de consumo por altitud

$$F_1 = \frac{P_s}{P_e} = \frac{\text{Presión estándar}}{\text{Presión en función la altitud}}$$

$$F_1 = \frac{14.7}{12.9} = 1.139$$

A este F<sub>1</sub> se le debe multiplicar a los requerimientos estándar:

$$\text{Consumo ajustado 1} = 176 \text{ cfm} \times 1.139 = 200.5 \text{ cfm}$$

### 3.2.3 Ajuste por consumo de fugas

En una red de tubería está expuesta a pérdidas por fugas, generalmente en minas el rango de perdida es del 5 al 20 % del consumo total.

#### Conexión entre manguera y la máquina perforadora 10%

$$\text{Consumo ajustado 2} = 200.5 \text{ cfm} \times 1.1 = 220.55 \text{ cfm}$$

#### Conexión entre la manguera diámetro mayor y manguera diámetro menor 10%

$$\text{Consumo ajustado 3} = 220.55 \times 1.1 = 242.605 \text{ cfm}$$

### 3.2.4 Ajuste consumo por utilización efectiva

Este ajuste corresponde al tiempo de trabajo de las maquinas, esto varía según el uso de la herramienta. Para este trabajo se considera un factor de corrección del 50%, esto se debe a que las máquinas pasan paradas aproximadamente la mitad del tiempo de trabajo.

$$\text{Consumo ajustado 4} = 242.605 \times 0.5 = 121.30 \text{ cfm}$$

### 3.2.5 Ajuste de consumo por simultaneidad

Este factor depende del número de máquinas en relación a su uso. En la mina tienen 15 perforadoras disponibles para ser usadas. Mediante la siguiente gráfica se obtiene el factor de corrección:



Figura 3.2 Abaco factor de corrección por simultaneidad.

De acuerdo a la gráfica el factor de corrección es 0.65 entonces:

$$\text{Consumo ajustado 5} = 121.30 \text{ cfm} \times 0.65 = 78.84 \approx 79 \text{ cfm}$$

### 3.2.6 Determinación el consumo total

Luego de obtener el consumo ajustado total de acuerdo a los factores de corrección, a partir de este se puede calcular el requerimiento total:

$$\text{Requerimiento total} = 79 \text{ cfm} \times \text{Número de perforadoras} = 79 \text{ cfm} \times 15 = 1185 \text{ cfm}$$

Tabla 3.5 Requerimiento total de las máquinas perforadoras

Nivel	Veta	Año 1		Año 2		Año 3	
		Nro. Maq.	cfm	Nro. Maq.	cfm	Nro. Maq.	cfm
O	Preventora Norte	1	79	1	79	1	79
O	Preventora Sur	1	79	1	79	1	79
O	Vetilla Sur	1	79	1	79	1	79
O	X Norte	1	79	1	79	1	79
O	X Sur	1	79	1	79	1	79
O	Cristina Norte	1	79	1	79	1	79
O	Cristina Sur	1	79	1	79	1	79
O	Jenn Norte	1	79	1	79	1	79
O	Jenn Sur	1	79	1	79	1	79
P	Cristina Sur	1	79	1	79	1	79
Q	Cristina Sur	1	79	1	79	1	79
R	Cristina Sur	1	79	1	79	1	79
Ñ	Cristina Sur Pozo	1	79	1	79	1	79
N	Cristina Norte	1	79	1	79	1	79
M	Cristina Sur	1	79	1	79	1	79
<b>TOTAL</b>		15	1185	15	1185	15	1185

### 3.2.7 Determinación de las longitudes de los ramales de la red propuesta

Esto ya fue definido en la tabla 3.4.

### 3.2.8 Balance de caudal en nodos

En base a la tabla 3.5 se tiene que el máximo consumo en el año 1 y de acuerdo a la distribución de las diferentes máquinas perforadoras, los consumos de éstas y el balanceo de caudales en la red en los nodos. Para balancear una red se debe en cuenta que las direcciones del flujo son definidas por los planos topográficos, los volúmenes de aire por ramal son determinados balanceando nodos desde las máquinas hacia el compresor.

Tabla 3.6 Longitudes y caudales de los ramales

<b>Nro.</b>	<b>Nivel</b>	<b>Veta</b>	<b>Descrip.</b>	<b>Long. Real Horizontal (ft)</b>	<b>Long. Real Vertical (ft)</b>	<b>Q (afcm)</b>
1	O	Acceso A	Socavón	1002.59		1185
2	O	Preventora Norte	Frontón	77.85		79
3	O	Preventora Sur	Frontón	59.68		79
4	O	Acceso B	Socavón	869.75		1027
5	O	Vetilla Sur	Frontón	81.43		79
6	O	Acceso C	Socavón	535.30		948
7	O	X Norte	Frontón	44.29		79
8	O	X Sur	Frontón	305.05		79
9	O	Acceso D	Socavón	157.35		790
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	665.50		79
11	O	CPA P1	Crucero	121.65		
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	389.40		79
13	O	CGE	Crucero	86.45		
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	130.31		79
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	376.28		
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	344.36		
17	O	Acceso E	Socavón	115.85		553
18	O	Jenn Norte	Frontón	114.83		79
19	O	Jenn Sur	Frontón	161.48		79
20	P	Cristina Sur	Chimenea		134.51	395
21	P	Cristina Sur	Crucero	96.49		
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	1299.05		79
23	Q	Cristina Sur	Chimenea		134.51	316
24	Q	Cristina Sur	Frontón	1536.81		79
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	180.71		
26	R	Cristina Sur	Chimenea		52.49	237
27	R	Cristina Sur B	Crucero	214.90		
28	R	Cristina Sur	Frontón	637.76		79
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo		95.14	
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	242.88		158
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	1310.73		79
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	97.60		

33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	167.36		
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo		13.12	79
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	397.31		79
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo		62.34	79
37	M	Cristina Sur Pozo - A	Frontón	391.08		79
38	M	Cristina Sur Pozo - B	Frontón	135.10		

### 3.2.9 Cálculo de las longitudes equivalentes

Se debe localizar los posibles accesorios a instalar.

Se debe calcular la longitud equivalente de cada uno de ellos y adicionar esto a la longitud original y obtener la longitud total.

Se debe asumir diámetros para los ramales de la red propuesta:

- Diámetro de línea principal: 4''
- Diámetro de línea secundaria: 2''

Se tiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 3.7 Longitudes equivalentes para la red propuesta

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	VC	C90°	T	R43	R42	R32	R31	R21	Long. Equiv. (ft)	Long. Tot. H (ft)	Long. Tot. V (ft)
1	O	Acceso A	Socavón	4	1002.59		3		2						23.1	1025.69	
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	77.85						1				3.7	81.51	
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	59.68						1				3.7	63.33	
4	O	Acceso B	Socavón	4	869.75		1		1						10.1	879.85	
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	81.43						1				3.7	85.08	
6	O	Acceso C	Socavón	4	535.30		2		2						20.2	555.51	
7	O	X Norte	Frontón	2	44.29						1				3.7	47.95	
8	O	X Sur	Frontón	2	305.05						1				3.7	308.71	
9	O	Acceso D	Socavón	4	157.35				1						7.2	164.57	
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	665.50		3		1						15.9	681.37	
11	O	CPA P1	Crucero	2	121.65			1			1				9.9	131.51	
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	4	389.40		1		1						10.1	399.51	
13	O	CGE	Crucero	2	86.45				1		1				7.8	94.24	
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	130.31		1		1						10.1	140.42	
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	2	376.28		2		1						7.4	383.72	
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	4	344.36		1	1	1						20.9	365.29	
17	O	Acceso E	Socavón	2	115.85			1	1						10.3	126.18	
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	114.83		1								1.7	116.48	
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	161.48		1								1.7	163.14	
20	P	Cristina Sur	Chimenea	2		134.51	1	1	1						12.0		146.50
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	96.49		1		1						5.8	102.28	

22	P	Cristina Sur - A	Frontón	2	1299.05	3	1		9.1	1308.14
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	2	134.51	1	1	1	12.0	146.50
24	Q	Cristina Sur	Frontón	2	1536.81	3		3	17.4	1554.17
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	180.71	1		1	5.8	186.50
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	52.49	1	1	1	12.0	64.48
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	214.90	2		2	11.6	226.47
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	637.76	2		2	11.6	649.34
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	95.14	1	1	1	12.0	107.13
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	242.88	2		2	11.6	254.45
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	1310.73	3		3	17.4	1328.09
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	97.60	1		1	5.8	103.39
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	167.36	2		2	11.6	178.93
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	13.12	1	1	1	12.0	25.11
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	397.31	3		3	17.4	414.67
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	62.34	1	1	1	12.0	74.32
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	391.08	2		2	7.4	398.52
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	135.10	1		1	5.8	140.89

### 3.2.10 Variación de presión debido a la altitud

Los sistemas de distribución de aire comprimido son tridimensionales, es decir tenemos cambios en altura (chimeneas, subniveles, piques) los cuales hacen que la presión varíe, para esto se tiene la ecuación de Bernoulli, ecuación (31).

$$\Delta P_h = \frac{\rho H}{144}$$

Se debe calcular el primer tramo de la red propuesta, con el siguiente dato

Densidad de fluido: 0.5624 lbm/ft<sup>3</sup>

### 3.2.11 Cálculo de las pérdidas de presión

La incorrecta selección de diámetros de manguera en un sistema de distribución de aire comprimido ocasionará caídas de presión entre el compresor y el frente de trabajo, ocasionando las siguientes consecuencias:

- Si se trabaja a una menor presión propuesta en la ficha técnica, hará que las perforadoras tendrán baja productividad.
- Si el compresor trabaja a una mayor presión para cubrir las pérdidas de la líneas de distribución y lograr así que las perforadoras trabajen de acuerdo a las indicaciones del fabricante, pero existirá un mayor gasto de energía.

En cualquiera de los casos mencionados anteriormente, existirán pérdidas económicas por baja productividad o por un mayor gasto de energía. Ambas pérdidas solventan el costo de un buen sistema de distribución de aire comprimido. Para obtener un correcto sistema de distribución de aire comprimido, se debe tener en cuenta que presión entre la descarga del compresor y el frente de trabajo no exceda el 10 %.

#### 3.2.11.1 Pérdidas de presión en manguera de toda la mina

Para calcular esto se pueden utilizar varios métodos. En éste trabajo sólo se utilizará la ecuación (35) de Darcy-Weisbach. Esta asume un proceso isotérmico y en consecuencia no hay cambios en la densidad del fluido.

$$\Delta P = \frac{f_p L v^2}{288 D g}$$

Se muestra el procedimiento de cálculo con la línea principal de la red propuesta.

Se tienen los siguientes datos:

Caudal de aire: 1185 cfm

Longitud de tubería: 1025,69 ft

Diámetro interno de tubería: 4.33 in

Temperatura: 73.4 °F

Presión atmosférica: 12.9 psi

Presión de entrada: 115 psi

Viscosidad absoluta: 0.018 cp

Constante de gas para el aire: 53.34 ft lbf/ (lbm °R)

Constante experimental: 32.174 ft lbf/(lbm s<sup>2</sup>)

Rugosidad absoluta: 0.00015 ft

Factor de deterioro: 35%

- Ratio de compresión

$$r = \frac{P_o + P_e}{P_e} \quad (44)$$

$$r = \frac{115 \text{ psi} + 12.9 \text{ psi}}{12.9 \text{ psi}}$$

$$r = 9.914$$

- Caudal de aire a la presión de operación

$$Q = \frac{Q_a \cdot 12.9 \text{ psi}}{r} \quad (45)$$

$$Q = \frac{1185 \text{ cfm}}{9.914}$$

$$Q = 119.519 \text{ cfm a } 115 \text{ psi}$$

- Área transversal de la tubería

$$A = \pi r^2 \quad (46)$$

$$A = \pi \left( \frac{4.33 \text{ in}}{2} \right)^2$$

$$A = 14.725 \text{ in}^2$$

- Velocidad del aire: utilizamos la ecuación 32:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{119.519 \text{ cfm} \times 144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}}{14.725 \text{ in}^2 \times 60 \frac{\text{s}}{\text{m}}}$$

$$V = 19.47 \text{ ft/s o fps}$$

- Temperatura absoluta: utilizamos la ecuación:

$$T_o = ^\circ\text{F} + 459.69$$

$$T_o = 73.4 + 459.69$$

$$T_o = 533.09 \text{ } ^\circ\text{R}$$

- Densidad del fluido

$$\rho = \frac{144 P_f}{R_c T_o} \quad (47)$$

$$\rho = \frac{144 (115 \text{ psi} + 12.9 \text{ psi})}{53.34 \text{ ft} \frac{\text{lb}_f}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{R}} \times 533.09 \text{ } ^\circ\text{R}}$$

$$\rho = 0.647 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

- Viscosidad relativa: utilizamos la ecuación

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$v = \frac{0.018 \text{ cp}}{0.647 \text{ lb}_m/\text{ft}^3}$$

$$v = 0.0277 \text{ cp ft}^3/\text{lb}_m$$

- Número de Reynolds: convirtiendo la ecuación (33) para trabajar en el sistema inglés.

$$R = \frac{10.325 D V}{v}$$

$$R = \frac{10.325 \times 4.33 \text{ in} \times 19.47 \text{ fps} \times 12 \text{ in/ft}}{0.0277 \text{ cp ft}^3/\text{lbm}}$$

$$R = 376053.18$$

- Rugosidad relativa: utilizamos la ecuación:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.00015 \text{ ft}}{\left(\frac{4.3 \text{ in}}{12 \text{ in/ft}}\right)} \quad (48)$$

$$\frac{\epsilon}{D} = 0.00042$$

- Factor de fricción de Moody: utilizamos la ecuación (37)

$$f = 0.0055 \left( 1 + \left( 2 \times 10^4 \times \frac{\epsilon}{D} + \frac{10^6}{N_R} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$f = 0.0055 \left( 1 + \left( 2 \times 10^4 \times 0.00042 + \frac{10^6}{376053.18} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$f = 0.018$$

- Caída de presión: utilizamos la ecuación (35)

$$\Delta P = \frac{f \rho L v^2}{2.88 D g}$$

$$\Delta P = \frac{0.018 \times 0.6477 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \times 1025.69 \text{ ft} \times 19.47^2 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}{288 \times 4.33 \text{ in} / \frac{12 \text{ in}}{\text{ft}} \times 32.174 \text{ ft} \frac{\text{lbm}}{\text{lbf s}^2}}$$

$$\Delta P = 1.34 \text{ psi}$$

- Factor de deterioro

$$\Delta P = 1.35 \times 1.34 \text{ psi}$$

$$\Delta P = 1.804 \text{ psi}$$

Se tiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 3.8 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach)

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	Long. Equiv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	ΔPH (psi)	ΔPV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	4	4.33	1002.59		23.1	1025.69		1185	115	113.20	1.804		1.80	1.80
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	2.48	77.85		3.7	81.51		79	113.20	113.18	0.0141		0.01	1.82
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	2.48	59.68		3.7	63.33		79	113.18	113.17	0.011		0.01	1.83
4	O	Acceso B	Socavón	4	4.33	869.75		10.1	879.85		1027	113.17	111.98	1.189		1.19	3.02
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	2.48	81.43		3.7	85.08		79	111.98	111.97	0.015		0.01	3.03
6	O	Acceso C	Socavón	4	4.33	535.30		20.2	555.51		948	111.97	111.32	0.649		0.65	3.68
7	O	X Norte	Frontón	2	2.48	44.29		3.7	47.95		79	111.32	111.31	0.0084		0.01	3.69
8	O	X Sur	Frontón	2	2.48	305.05		3.7	308.71		79	111.31	111.26	0.0543		0.05	3.74
9	O	Acceso D	Socavón	4	4.33	157.35		7.2	164.57		790	111.26	111.12	0.136		0.14	3.88
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	665.50		15.9	681.37		79	111.12	111.11	0.0079		0.01	3.89
11	O	CPA P1	Crucero	2	2.48	121.65		9.9	131.51		79	111.11	111.09	0.0232		0.02	3.91
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	4	4.33	389.40		10.1	399.51		79	111.09	111.08	0.0046		0.00	3.92
13	O	CGE	Crucero	2	2.48	86.45		7.8	94.24		79	111.08	111.07	0.0159		0.02	3.93
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	4.33	130.31		10.1	140.42		79	111.07	111.07	0.0016		0.00	3.93
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	2	2.48	376.28		7.4	383.72		79	111.07	111.0	0.0669		0.07	4.00
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	4	4.33	344.36		20.9	365.29		79	111	110.99	0.0042		0.00	4.01
17	O	Acceso E	Socavón	2	2.48	115.85		10.3	126.18		553	110.99	109.74	1.251		1.25	5.26
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		1.7	116.48		79	109.74	109.72	0.028		0.03	5.28
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	2.48	161.48		1.7	163.14		79	109.72	109.68	0.0396		0.04	5.32
20	P	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		134.51	12.0		146.50	395	109.68	109.13		0.552	0.55	5.87

21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49	5.8	102.28	79	109.13	109.11	0.0183	0.02	5.89
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	2	2.48	1299.05	9.1	1308.14	79	109.11	108.87	0.2344	0.23	6.13
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48	134.51	12.0	146.50	316	108.87	108.40	0.478	0.48	6.60
24	Q	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	1536.81	17.4	1554.17	79	108.40	108.12	0.280	0.28	6.88
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71	5.8	186.50	79	108.12	108.08	0.0337	0.03	6.92
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48	52.49	12.0	64.48	237	108.08	107.99	0.0919	0.09	7.01
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90	11.6	226.47	79	107.99	107.95	0.0410	0.04	7.05
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76	11.6	649.34	79	107.95	107.83	0.1175	0.12	7.17
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	95.14	12.0	107.13	79	109.68	109.66	0.019	0.02	5.34
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	242.88	11.6	254.45	158	109.66	109.49	0.166	0.17	5.51
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	2.48	1310.73	17.4	1328.09	79	109.49	109.25	0.237	0.24	5.75
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	2.48	97.60	5.8	103.39	79	109.25	109.24	0.0185	0.02	5.76
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36	11.6	178.93	79	109.24	109.20	0.032	0.03	5.80
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	13.12	12.0	25.11	79	109.20	109.20	0.0045	0.00	5.80
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31	17.4	414.67	79	109.20	109.12	0.0742	0.07	5.88
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	62.34	12.0	74.32	79	109.12	109.11	0.0133	0.01	5.89
37	M	Cristina Sur Pozo - A	Frontón	2	2.48	391.08	7.4	398.52	79	109.11	109.04	0.0714	0.07	5.96
38	M	Cristina Sur Pozo - B	Frontón	2	2.48	135.10	5.8	140.89	79	109.04	109.01	0.0253	0.03	5.99

### 3.2.11.2 Pérdidas de presión en mangueras de subniveles

Tenemos que calcular éste impacto para el punto con mayor caída de presión (línea 28, Nivel R - Cristina Sur - Frontón) desarrollando los cálculos del punto anterior. Así mismo se considera la cantidad de aire que entra de manguera de mayor diámetro a la manguera de menor diámetro que es 242.61 cfm (ver punto 3.1.5.1.2).

Caudal de aire: 242.61 cfm

Longitud de tubería: 66 ft (20m)

Diámetro interno de tubería: 1.26 in

Temperatura: 73.4 °F

Presión atmosférica: 12.9 psi

Presión de entrada: 107.83 psi (presión de salida del punto con mayor caída de presión)

Viscosidad absoluta: 0.018 cp

Constante de gas para el aire: 53.34 ft lbf/ (lbm °R)

Constante experimental: 32.174 ft lbf/ (lbf s<sup>2</sup>)

Rugosidad absoluta: 0.00015 ft

Factor de deterioro: 35%

Tabla 3.9 Caída de presión en mangueras en subniveles

Descripción	Símbolo	Cantidad
Caudal de aire	Q	242.61 cfm
Longitud de la manguera	L	66 ft
Diámetro de la manguera	D	1.26 in
Área transversal de la manguera	A	0.785 in <sup>2</sup>
Presión de entrada	P1	107.83 psi
Temperatura interna	T	73.4 °F
Presión atmosférica	Pa	12.9 psi
Viscosidad absoluta	va	0.018 cp
Constante de gas para el aire	Rc	53.34 ft lbf/(lbm °R)
Rugosidad relativa	$\epsilon/D$	0.000143
Constante experimental	g	35 ft lbf/(lbm s <sup>2</sup> )
Ratio de compresión	r	9.3589
Caudal de aire	Q	25.9229 cfm
Velocidad del aire	v	49.8957 fps
Temperatura absoluta	To	533.09 °R
Densidad del fluido	$\rho$	0.6114 lbm/ft <sup>3</sup>

Viscosidad relativa	v	0.02944 cp ft <sup>3</sup> /lbm
Número de Reynolds	R	264579.97
Factor de rugosidad de Moody	f	0.023
Caída de presión	$\Delta p$	2.377 psi
Caída de presión ajustada	$\Delta p$	3.2095 psi
Presión de salida	P2	104.62si

Esta presión final satisface los requerimientos de funcionamiento de la máquina perforada (104.62 psi < 91.4 psi).

### 3.2.11.3 Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles

En el siguiente cuadro se presenta el requerimiento de presión que debe proveer la red propuesta a cada perforadora, usar función buscar en Excel para hallar el valor de 91.4 justo de acuerdo a la presión de entrada a cada perforadora.

Tabla 3.10 Optimización de caída de presión en mangueras en subniveles

<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Cantidad</b>
Caudal de aire	Q	242.61 cfm
Longitud de la manguera	L	66 ft
Diámetro de la manguera	D	1.26 in
Área transversal de la manguera	A	1.24
Presión de entrada	P1	94.992 psi
Temperatura interna	T	73.4 °F
Presión atmosférica	Pa	12.9 psi
Viscosidad absoluta	va	0.0018 cp
Constante de gas para el aire	Rc	53.34 ft lbf/(lbm °R)
Rugosidad relativa	$\epsilon/D$	0.00015
Constante experimental	g	35 ft lbf/(lbm s <sup>2</sup> )
Ratio de compresión	r	8.3637
Caudal de aire	Q	29 cfm
Velocidad del aire	v	55.83 fps
Temperatura absoluta	To	533.09 °R
Densidad del fluido	$\rho$	0.546 lbm/ft <sup>3</sup>
Viscosidad relativa	v	0.00329 cp ft <sup>3</sup> /lbm
Número de Reynolds	R	264579.97
Factor de rugosidad de Moody	f	0.023
Caída de presión	$\Delta p$	2.66 psi

Caída de presión ajustada	$\Delta p$	3.5914 psi
Presión de salida	P2	91.4 psi

Esta presión final satisface los requerimientos de funcionamiento de la máquina perforada ( $91.4 \text{ psi} < 91.4 \text{ psi}$ ), la presión de salida de la tubería debe ser 94.99 psi para que la máquina perforadora opere con 91.4 psi. Con estos datos vamos a corregir los cálculos realizados en el punto anterior.

#### **3.2.11.4 Presión de entrada**

El abastecimiento de aire para el Nivel R - Cristina Sur – Frontón es la que menos presión tenía, en base a eso se realiza un recálculo, con el fin que las perforadoras operen a la presión necesaria en cada frente de trabajo con el valor correcto de presión de salida de las mangueras ( $\geq 94.99 \text{ psi}$ ) para eso la presión de salida del compresor es psi.

Tabla 3.11 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	Long. g. Equ iv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	ΔPH (psi)	ΔPV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	4	4.33	1002.59		23.1	1025.69		1185	102.45	100.45	2.001		2.00	2.00
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	2.48	77.85		3.7	81.51		79	100.45	100.43	0.0157		0.02	2.02
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	2.48	59.68		3.7	63.33		79	100.43	100.42	0.0122		0.01	2.03
4	O	Acceso B	Socavón	4	4.33	869.75		10.1	879.85		1027	100.42	99.10	1.323		1.32	3.35
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	2.48	81.43		3.7	85.08		79	99.10	99.08	0.0166		0.02	3.37
6	O	Acceso C	Socavón	4	4.33	535.30		20.2	555.51		948	99.08	98.36	0.724		0.72	4.09
7	O	X Norte	Frontón	2	2.48	44.29		3.7	47.95		79	98.36	98.35	0.0094		0.01	4.10
8	O	X Sur	Frontón	2	2.48	305.05		3.7	308.71		79	98.35	98.29	0.0607		0.06	4.16
9	O	Acceso D	Socavón	4	4.33	157.35		7.2	164.57		790	98.29	98.14	0.152		0.15	4.31
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	665.50		15.9	681.37		79	98.14	98.13	0.0088		0.01	4.32
11	O	CPA P1	Crucero	2	2.48	121.65		9.9	131.51		79	98.13	98.10	0.0259		0.03	4.35
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	4	4.33	389.40		10.1	399.51		79	98.10	98.10	0.0052		0.0052	4.35
13	O	CGE	Crucero	2	2.48	86.45		7.8	94.24		79	98.10	98.08	0.0186		0.02	4.37
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	4.33	130.31		10.1	140.42		79	98.08	98.08	0.0018		0.0018	4.37
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	2	2.48	376.28		7.4	383.72		79	98.08	98.00	0.0756		0.08	4.45
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	4	4.33	344.36		20.9	365.29		79	98.00	97.99	0.0047		0.00	4.46
17	O	Acceso E	Socavón	2	2.48	115.85		10.3	126.18		553	97.99	96.98	1.013		1.01	5.47
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		1.7	116.48		79	96.98	96.96	0.023		0.02	5.49
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	2.48	161.48		1.7	163.14		79	96.96	96.93	0.0325		0.03	5.52
20	P	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		134.51	12.0		146.50	395	96.93	96.31		0.617	0.62	6.14
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49		5.8	102.28		79	96.31	96.29	0.0205		0.02	6.16

22	P	Cristina Sur - A	Frontón	2	2.48	1299.05	9.1	1308.14	79	96.29	96.03	0.262	0.26	6.42
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48	134.51	12.0	146.50	316	96.03	95.62	0.4035	0.40	6.83
24	Q	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	1536.81	17.4	1554.17	79	95.62	95.31	0.313	0.31	7.14
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71	5.8	186.50	79	95.31	95.27	0.038	0.04	7.18
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48	52.49	12.0	64.48	237	95.27	95.17	0.103	0.10	7.28
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90	11.6	226.47	79	95.17	95.12	0.046	0.05	7.33
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76	11.6	649.34	79	95.12	94.99	0.131	0.13	7.46
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	95.14	12.0	107.13	79	96.93	96.90	0.021	0.02	5.55
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	242.88	11.6	254.45	158	96.90	96.72	0.185	0.18	5.73
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	2.48	1310.73	17.4	1328.09	79	96.72	96.45	0.265	0.26	6.00
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	2.48	97.60	5.8	103.39	79	96.45	96.43	0.0207	0.02	6.02
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36	11.6	178.93	79	96.43	96.40	0.0358	0.04	6.05
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	13.12	12.0	25.11	79	96.40	96.39	0.0050	0.01	6.06
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31	17.4	414.67	79	96.39	96.31	0.083	0.08	6.14
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48	62.34	12.0	74.32	79	96.31	96.30	0.0149	0.01	6.15
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	2.48	391.08	7.4	398.52	79	96.30	96.22	0.0798	0.08	6.23
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	2.48	135.10	5.8	140.89	79	96.22	96.19	0.0282	0.03	6.26

### 3.2.11.5 Cálculo de la potencia del compresor

En base al cálculo de las presiones halladas en el punto 3.1.5.1.9.1, podemos calcular la potencia del compresor.

Potencia teórica del compresor (Hp):

$$\frac{H_p}{102.45 \text{ cfm}} = 3.084 P_e (r^{0.1415} - 1)$$

$$r = \frac{102.45 \text{ psi} + 12.9 \text{ psi}}{12.9 \text{ psi}}$$

$$r = 8.94$$

$$H_p = 3.084 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2} \times 12.9 \text{ psi} \times (8.94^{0.1415} - 1) \times \frac{1185 \text{ cfm}}{102.45 \text{ cfm}}$$

$$H_p = 167$$

Se divide la potencia teórica entre la eficiencia de la máquina para hallar la potencia real del compresor:

$$\text{bhp} = 167 \frac{\text{hp}}{\text{ef}}$$

$$\text{bhp} = \text{hp} \times 85\%$$

$$\text{bhp} = 142 \text{ Hp}$$

### 3.2.11.6 Evaluación económica

Se presenta el siguiente cuadro resumen con el total de materiales a instalar en la red propuesta (escenario 1), costos unitarios de los materiales y el costo de la instalación:

Tabla 3.12 Materiales a instalar en la red propuesta

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unid.</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Costo</b>
Válvula compuerta 4"	16	und.	\$17.28	\$ 276.416
Válvula compuerta 2"	32	und.	\$4.31	\$ 137.984
Codo 90° 4"	3	und.	\$3.56	\$ 10.668
Codo 90° 2"	6	und.	\$1.96	\$ 5.88
Tee 4"	13	und.	\$5.11	\$ 66.43
Tee 2"	30	und.	\$2.52	\$ 75.6

Reducción 4" a 2"	7	und.	\$3.57	\$ 24.99
Manguera 4" (m)	1600	Rollo	\$14.73	\$ 392.8
Manguera 2" (m)	3000	Rollo	\$7.38	\$ 221.4
			Subtotal	\$ 1212.168

El costo de instalación se considera como 20% del costo de tubería, entonces:

$$\text{Costo de instalación} = 20\% \times \$ 614.2$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 112.84$$

Tenemos los siguientes gastos:

- Mantenimiento de la red
- Costo de energía
- Horas de operación por día: h/día
- Conversión hp a kWh: 0.7457 kW/hp

Costo anual de mantenimiento de la red:

$$\text{Costo de mantenimiento} = 7\% \times \$614.2$$

$$\text{Costo de mantenimiento} = \$ 42.99 /\text{año}$$

### 3.2.11.7 Flujo de caja

Para el sistema de aire comprimido se estima una proyección de producción de 3 años, considerando las reservas probadas de la mina, las mismas que podrían variar si se realizan campañas de exploración para aumentar las reservas. Para este proyecto se debe llevar a cabo el cálculo de la rentabilidad, los principales aspectos que se deben analizar son los ingresos y el total de los egresos, en cada uno se consideran factores como la sustentabilidad del proyecto, el capital disponible, inversión.

En la mina O Nivel se realiza la venta de material a través de volquetas diarias, para el cálculo de los ingresos mensuales se considera la cantidad de volquetes diarios, el costo de su alquiler por hora y las horas recorridas hasta la planta de tratamiento ubicada en Portovelo.

Tabla 3.13 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1

<b>Ingresos por ventas</b>		<b>Ia/3años</b>	<b>\$ 226 800</b>
<b>Item</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Costos/h alquiler</b>
<b>Volquetes</b>	4	7 m <sup>3</sup>	35
			<b>Horas recorridas</b>
			1.5
			<b>Subtotal</b>
			\$ 210.00
			<b>Total mensual</b>
			\$ 6 300.00

Para cubrir los gastos destinados al proyecto se consideran los siguientes factores:

Tabla 3.14 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 1

<b>Horas de trabajo al día</b>	<b>h/día</b>	<b>12</b>
<b>Costo de kW/h</b>	<b>\$/kwh</b>	<b>\$ 0.0823</b>
<b>Consumo de energía</b>	<b>kWh/mes</b>	<b>\$ 19 500</b>

Tabla 3.15 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1

<b>INSUMOS</b>	
Señalética	\$ 940.80
Accesorios de oficina	\$ 568.37
Equipo de protección personal	\$ 1,257.85
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8,301.06</b>
<b>SUELDO MINA</b>	
Capataz	\$ 2 513.40
Perforista	\$ 2 826.67
Ayudante perforista	\$ 3 024.97
Obrero mina	\$ 5 172.83
Operador winche	\$ 1 983.20
Operador locomotora	\$ 2 093.57
Polvorines	\$ 1 852.67
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 58 401.93</b>
<b>SUELDO ADMINISTRATIVO</b>	
Jefe de geología	\$ 1 386.00
Jefe de SSO	\$ 1 286.00
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8 016.00</b>
<b>OBRAS ANEXAS</b>	
Herramientas	\$ 977.00
Insumos de perforación	\$ 5 095.00
Repuestos de perforadora	\$ 3 855.60
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 29 782.80</b>

Para las obligaciones legales deben cumplirse el pago de patentes y regalías, el pago de patentes de conservación equivale al 10% de una remuneración básica unificada por hectárea minera concesionada y para el pago de regalías se considera el 3% de las ventas.

Tabla 3.16 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 1

<b>IMPOSICIONES</b>	
<b>Patente</b>	
# Hectáreas	13
%	2
SBU	\$386.00
20% SBU	7.72
<b>Total</b>	<b>\$301.08</b>
<b>Regalías</b>	
%	3
Subtotal	\$104,501.79
<b>Total</b>	<b>\$9,405.16</b>

Finalmente se presenta el flujo de caja para el obtener la rentabilidad del escenario. La rentabilidad es un porcentaje que indica la cantidad de dinero que una inversión fija podría producir en período de tiempo. La rentabilidad caracteriza la eficiencia económica del proyecto y se calcula dividiendo la utilidad neta para la inversión fija, cálculos que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.17 Flujo de caja escenario 1

<b>COMPañÍA MINERA ASOPROMIN S.A.</b>	
<b>FLUJO DE CAJA</b>	
<b>Inversión inicial</b>	
Material	\$ 1 212.17
Mantenimiento de la red	\$ 128.98
Costo de energía	\$ 4 814.55
Máquina termofusora	\$ 7 000
Inversión requerida en implementación	\$ 122.84
<b>Inversión fija</b>	
Inversión inicial + inversión implementación	\$ 13 278.54
Producción mensual (ton)	2600
Ley media ponderada (gr Au/ton)	3.5
Precio oro (\$/gr)	48.12
Tiempo de proyección del proyecto (años)	3
Tasa de interés	12%
Amortización	\$ 4 426.18

<b>Ingresos</b>	
Ingreso por ventas	\$ 226 800
<b>Egresos</b>	
Insumos	\$ 8 301.06
Sueldo mina	\$ 58 401.93
Sueldo administrativo	\$ 8 016
Obras anexas	\$ 29 782.8
Subtotal	\$ 104 501.79
Flujo efectivo neto	\$ 122 298.21
<b>Imposiciones</b>	
Patente	\$ 301.08
Regalías	\$ 9 405.16
Subtotal	\$ 116 474.89
UTILIDAD BRUTA	\$ 117 872.03
UTILIDAD DESPUES DE IMPOSICIONES	\$ 1 397.14
<b>RENTABILIDAD (%)</b>	<b>10.52%</b>

### 3.2.12 Optimización del sistema de aire comprimido

Para optimizar el sistema de aire comprimido diseñaran tres escenarios, con diferentes variables.

- Escenario 1 (E1): Tubería primaria de 4'' y tubería secundaria 2'' (diseño calculado en los puntos anteriores).
- Escenario 2 (E2): Tubería primaria de 5'' y tuberías secundarias de 4'', 3'', 2''
- Escenario 3 (E3): Tubería primaria de 4'' y tuberías secundarias de 3'', 2''

#### 3.2.12.1 Escenario 2

##### 3.2.12.1.1 Cálculo de longitudes equivalentes

Se debe asumir diámetros para los ramales de la red propuesta:

- Diámetro de la línea principal: 5''
- Diámetro de línea secundaria: 4'', 3'' y 2''

Se tiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 3.18 Longitudes equivalentes para el escenario 2

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. (pulg)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	VC	C90°	T	R53	R54	R43	R32	R42	Long. Equiv. (ft)	Long. Tot. H (ft)	Long. Tot. V (ft)
1	O	Acceso A	Socavón	5	1002.59		2		1						16.5	1019.12	
2	O	Preventora Norte	Frontón	3	77.85		1			1					6.5	84.32	
3	O	Preventora Sur	Frontón	3	59.68				1	1					10.7	70.39	
4	O	Acceso B	Socavón	5	869.75		1		1						12.9	882.61	
5	O	Vetilla Sur	Frontón	3	81.43					1					4.8	86.24	
6	O	Acceso C	Socavón	5	535.3		1		1						12.9	548.16	
7	O	X Norte	Frontón	3	44.29		1			1					7.2	51.46	
8	O	X Sur	Frontón	3	305.05				1	1					10.7	315.76	
9	O	Acceso D	Socavón	5	157.35		1		1						12.9	170.21	
10	O	Cristina Sur – A	Frontón	5	665.5		3								11.0	676.52	
11	O	CPA P1	Crucero	3	121.65				1	1					10.7	132.36	
12	O	Cristina Sur – B	Frontón	5	389.4		1								3.7	393.07	
13	O	CGE	Crucero	3	86.45				1	1					10.7	97.16	
14	O	Cristina Sur – C	Frontón	5	130.31		1		1						12.9	143.17	
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	5	376.28		1		1						17.4	393.73	
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	3	344.36		2								4.7	349.08	
17	O	Acceso E	Socavón	3	115.85				1	1					10.7	126.56	
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	114.83		1						1		4.4	119.25	
19	O	Jenn Sur	Frontón	3	161.48		1		1						8.3	169.74	
20	P	Cristina Sur	Chimenea	4		134.51	1	1	1		1				25.0		159.50
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	96.49		1		1					1	9.4	105.93	

22	P	Cristina Sur – A	Frontón	4	1299.05		3	3		30.3	1329.36	
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	3		134.51	1	1	1	1	19.8	154.34
24	Q	Cristina Sur	Frontón	3	1536.81		3		3		24.8	1561.59
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	180.71		1	2	1	1	21.0	201.67
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2		52.49	1	1	1	1	14.8	67.25
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	214.9		2		2		11.6	226.47
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	637.76		2		2		11.6	649.33
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	3		95.14	1	1	1		17.1	112.25
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	3	242.88		1	1	1	1	18.1	260.99
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	3	1310.73		1		1		8.3	1318.99
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	3	97.6		2		2		22.4	120.02
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	167.36		1		1	1	10.6	177.98
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2		13.12	1	1	1	1	14.8	27.88
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	397.31		3		3		17.4	414.67
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2		62.34	1	1	1		12.0	74.33
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	391.08		2		2		11.6	402.65
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	135.1		1		1		5.8	140.89

### **3.2.12.1.2 Pérdidas de presión en mangueras de toda la mina**

Se muestra el procedimiento de cálculo con la línea principal del escenario 2.

Se tienen los siguientes datos:

Caudal de aire: 1185 cfm

Longitud de tubería: 1019.12 ft

Diámetro interno de tubería: 5.51 in

Temperatura: 73.4 °F

Presión atmosférica: 12.9 psi

Presión de entrada: 115 psi

Viscosidad absoluta: 0.018 cp

Constante de gas para el aire: 53.34 ft lbf/ (lbm °R)

Constante experimental: 32.174 ft lbf/ (lbf s<sup>2</sup>)

Rugosidad absoluta: 0.00015 ft

Factor de deterioro: 35%

Tabla 3.19 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) para el escenario 2

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	Long. Equiv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	ΔPH (psi)	ΔPV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	5	5.51	1002.59		16.5	1019.12		1185	115	114.48	0.525		0.5249	0.52
2	O	Preventora Norte	Frontón	3	3.54	77.85		6.5	84.32		79	114.48	114.47	0.0025		0.0025	0.53
3	O	Preventora Sur	Frontón	3	3.54	59.68		10.7	70.39		79	114.47	114.47	0.0021		0.0021	0.53
4	O	Acceso B	Socavón	5	5.51	869.75		12.9	882.61		1027	114.47	114.12	0.347		0.3469	0.88
5	O	Vetilla Sur	Frontón	3	3.54	81.43		4.8	86.24		79	114.12	114.12	0.0026		0.0026	0.88
6	O	Acceso C	Socavón	5	5.51	535.30		12.9	548.16		948	114.12	113.94	0.1854		0.1854	1.06
7	O	X Norte	Frontón	3	3.54	44.29		7.2	51.46		79	113.94	113.93	0.0016		0.0016	1.07
8	O	X Sur	Frontón	3	3.54	305.05		10.7	315.76		79	113.93	113.92	0.0095		0.0095	1.08
9	O	Acceso D	Socavón	5	5.51	157.35		12.9	170.21		790	113.92	113.88	0.041		0.0407	1.12
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	5	5.51	665.50		11.0	676.52		79	113.88	113.88	0.0024		0.0024	1.12
11	O	CPA P1	Crucero	3	3.54	121.65		10.7	132.36		79	113.88	113.88	0.0040		0.0040	1.12
12	O	Cristina Sur - B	Frontón	5	5.51	389.40		3.7	393.07		79	113.88	113.88	0.0014		0.0014	1.12
13	O	CGE	Crucero	3	3.54	86.45		10.7	97.16		79	113.88	113.87	0.0029		0.0029	1.13
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	5	5.51	130.31		12.9	143.17		79	113.87	113.87	0.0005		0.0005	1.13
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	5	5.51	376.28		17.4	393.73		79	113.87	113.87	0.0014		0.0014	1.13
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	3	3.54	344.36		4.7	349.08		79	113.87	113.86	0.0105		0.0105	1.14
17	O	Acceso E	Socavón	3	3.54	115.85		10.7	126.56		553	113.86	113.72	0.144		0.1437	1.28
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		4.4	119.25		79	113.72	113.70	0.0206		0.0206	1.30
19	O	Jenn Sur	Frontón	3	3.54	161.48		8.3	169.74		79	113.70	113.69	0.0051		0.0051	1.31
20	P	Cristina Sur	Chimenea	4	4.33		134.51	25.0		159.50	395	113.69	113.66		0.0345	0.0345	1.34
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49		9.4	105.93		79	113.66	113.64	0.0183		0.0183	1.36
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	1299.05		30.3	1329.36		79	113.64	113.62	0.0151		0.0151	1.38
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	3	3.54		134.51	19.8		154.34	316	113.62	113.56		0.0603	0.0603	1.44
24	Q	Cristina Sur	Frontón	3	3.54	1536.81		24.8	1561.59		79	113.56	113.52	0.0472		0.0472	1.48

25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71		21.0	201.67		79	113.52	113.48	0.0349	0.0349	1.52	
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		52.49	14.8		67.25	237	113.48	113.39		0.0918	0.0918	1.61
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90		11.6	226.47		79	113.39	113.35	0.0392	0.0392	1.65	
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76		11.6	649.33		79	113.25	113.14	0.1125	0.1125	1.86	
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	3	3.54		95.14	17.1		112.25	79	113.69	113.69		0.0034	0.0034	1.31
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	3	3.54	242.88		18.1	260.99		158	113.69	113.66	0.0279	0.0279	1.34	
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	3	3.54	1310.73		8.3	1318.99		79	113.66	113.62	0.0398	0.0398	1.38	
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	3	3.54	97.60		22.4	120.02		79	113.62	113.62	0.0036	0.0036	1.38	
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36		10.6	177.98		79	113.62	113.59	0.0308	0.0308	1.41	
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		13.12	14.8		27.88	79	113.59	113.58		0.0048	0.0048	1.42
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31		17.4	414.67		79	113.58	113.51	0.0717	0.0717	1.49	
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		62.34	12.0		74.33	79	113.51	113.50		0.0129	0.0129	1.50
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	2.48	391.08		11.6	402.65		79	113.50	113.43	0.0696	0.0696	1.57	
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	2.48	135.10		5.8	140.89		79	113.43	113.40	0.0244	0.0244	1.60	

### 3.2.12.1.3 Pérdidas de presión en mangueras de subniveles

Tabla 3.20 Caída de presión en mangueras en subniveles para el escenario 2

Descripción	Símbolo	Cantidad
Caudal de aire	Q	242.61 cfm
Longitud de la manguera	L	66 ft
Diámetro de la manguera	D	1.26 in
Área transversal de la manguera	A	1.2469 in <sup>2</sup>
Presión de entrada	P1	113.14 psi
Temperatura interna	T	73.4 °F
Presión atmosférica	Pa	12.9 psi
Viscosidad absoluta	va	0.018 cp
Constante de gas para el aire	Rc	53.34 ft lbf/(lbm °R)
Rugosidad relativa	$\epsilon/D$	0.000143
Constante experimental	g	35 ft lbf/(lbm s <sup>2</sup> )
Ratio de compresión	r	9.7705
Caudal de aire	Q	24.8308 cfm
Velocidad del aire	v	47.794 fps
Temperatura absoluta	To	533.09 °R
Densidad del fluido	$\rho$	0.6383 lbm/ft <sup>3</sup>
Viscosidad relativa	v	0.0282 cp ft <sup>3</sup> /lbm
Número de Reynolds	R	264579.97
Factor de rugosidad de Moody	f	0.023
Caída de presión	$\Delta p$	2.2773 psi
Caída de presión ajustada	$\Delta p$	3.0743 psi
Presión de salida	P2	110.07 psi

Esta presión final satisface los requerimientos de funcionamiento de la máquina perforada (110.07 psi < 91.4 psi).

### 3.2.12.1.4 Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles

Como se mostró en el punto 3.2.11.4, la presión de salida de la tubería debe ser 94.99 psi para que la máquina perforadora opere con 91.4 psi. Con estos datos vamos a corregir los cálculos realizados en el punto anterior para el escenario 2.

### 3.2.12.1.5 Presión de entrada

Tabla 3.21 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada para el escenario 2

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	Long. Equiv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	ΔPH (psi)	ΔPV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	5	5.51	1002.59		16.5	1019.12		1185	97.05	96.44	0.611		0.6108	0.61
2	O	Preventora Norte	Frontón	3	3.54	77.85		6.5	84.32		79	96.44	96.44	0.0029		0.0029	0.61
3	O	Preventora Sur	Frontón	3	3.54	59.68		10.7	70.39		79	96.44	96.43	0.0025		0.0025	0.62
4	O	Acceso B	Socavón	5	5.51	869.75		12.9	882.61		1027	96.43	96.03	0.4043		0.4043	1.02
5	O	Vetilla Sur	Frontón	3	3.54	81.43		4.8	86.24		79	96.03	96.03	0.0030		0.0030	1.02
6	O	Acceso C	Socavón	5	5.51	535.30		12.9	548.16		948	96.03	95.81	0.216		0.2162	1.24
7	O	X Norte	Frontón	3	3.54	44.29		7.2	51.46		79	95.81	95.81	0.0018		0.0018	1.24
8	O	X Sur	Frontón	3	3.54	305.05		10.7	315.76		79	95.81	95.80	0.0111		0.0111	1.25
9	O	Acceso D	Socavón	5	5.51	157.35		12.9	170.21		790	95.80	95.75	0.0475		0.0475	1.30
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	5	5.51	665.50		11.0	676.52		79	95.75	95.75	0.0028		0.0028	1.30
11	O	CPA P1	Crucero	3	3.54	121.65		10.7	132.36		79	95.75	95.74	0.0047		0.0047	1.31
12	O	Cristina Sur - B	Frontón	5	5.51	389.40		3.7	393.07		79	95.74	95.74	0.0016		0.0016	1.31
13	O	CGE	Crucero	3	3.54	86.45		10.7	97.16		79	95.74	95.74	0.0034		0.0034	1.31
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	5	5.51	130.31		12.9	143.17		79	95.74	95.74	0.0006		0.0006	1.31
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	5	5.51	376.28		17.4	393.73		79	95.74	95.74	0.0016		0.0016	1.31
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	3	3.54	344.36		4.7	349.08		79	95.74	95.72	0.0123		0.0123	1.33
17	O	Acceso E	Socavón	3	3.54	115.85		10.7	126.56		553	95.72	95.56	0.1677		0.1677	1.49
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		4.4	119.25		79	95.56	95.53	0.0240		0.0240	1.52
19	O	Jenn Sur	Frontón	3	3.54	161.48		8.3	169.74		79	95.53	95.53	0.0060		0.0060	1.52
20	P	Cristina Sur	Chimenea	4	4.33		134.51	25.0		159.50	395	95.53	95.48		0.0404	0.0404	1.57
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49		9.4	105.93		79	95.48	95.46	0.0214		0.0214	1.59
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	1299.05		30.3	1329.36		79	95.46	95.45	0.0177		0.0177	1.60
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	3	3.54		134.51	19.8		154.34	316	95.45	95.38		0.0704	0.0704	1.67
24	Q	Cristina Sur	Frontón	3	3.54	1536.81		24.8	1561.59		79	95.38	95.32	0.0551		0.0551	1.73
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71		21.0	201.67		79	95.32	95.28	0.0408		0.0408	1.77

26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		52.49	14.8	67.25	237	95.28	95.17		0.1073	0.1073	1.88
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90		11.6	226.47	79	95.17	95.13	0.046		0.0458	1.92
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76		11.6	649.33	79	95.13	94.99	0.1315		0.1315	2.06
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	3	3.54		95.14	17.1	112.25	79	95.53	95.52		0.0040	0.0040	1.53
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	3	3.54	242.88		18.1	260.99	158	95.52	95.49	0.0320		0.0320	1.56
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	3	3.54	1310.73		8.3	1318.99	79	95.49	95.44	0.0465		0.0465	1.61
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	3	3.54	97.60		22.4	120.02	79	95.44	95.44	0.0039		0.0039	1.61
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36		10.6	177.98	79	95.44	95.40	0.0359		0.0359	1.65
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		13.12	14.8	27.88	79	95.40	95.40		0.0056	0.0056	1.65
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31		17.4	414.67	79	95.40	95.32	0.0820		0.0820	1.73
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		62.34	12.0	74.33	79	95.32	95.30		0.0138	0.0138	1.75
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	2.48	391.08		11.6	402.65	79	95.30	95.22	0.0805		0.0805	1.83
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	2.48	135.10		5.8	140.89	79	95.22	95.19	0.0277		0.0277	1.86

### 3.2.12.1.6 Cálculo de la potencia del compresor

Potencia teórica del compresor (Hp):

$$r = \frac{97.05 \text{ psi} + 12.9 \text{ psi}}{12.9 \text{ psi}}$$

$$r = 8.52$$

$$Hp = 3.084 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2} \times 12.9 \text{ psi} \times (8.52^{0.1415} - 1) \times \frac{1185 \text{ cfm}}{97.05 \text{ cfm}}$$

$$Hp = 172$$

Se divide la potencia teórica entre la eficiencia de la máquina para hallar la potencia real del compresor:

$$\text{bhp} = \frac{\text{hp}}{\text{ef}}$$

$$\text{bhp} = \text{hp} \times 85\%$$

$$\text{bhp} = 146 \text{ Hp}$$

### 3.2.12.1.7 Evaluación económica

Se presenta el siguiente cuadro resumen con el total de materiales a instalar en la red propuesta, costos unitarios de los materiales y el costo de la instalación:

Tabla 3.22 Materiales a instalar en la red propuesta

Descripción	Cantidad	Unid.	Precio Unitario	Costo
Válvula compuerta 5"	11	und.	\$ 17.28	\$ 190.04
Válvula compuerta 4"	4	und.	\$ 14.95	\$ 59.81
Válvula compuerta 3"	14	und.	\$ 10.57	\$ 147.98
Válvula compuerta 2"	17	und.	\$ 4.31	\$ 73.30
Codo 90° 5"	1	und.	\$ 9.17	\$ 9.17
Codo 90° 4"	1	und.	\$ 3.56	\$ 3.56
Codo 90° 3"	3	und.	\$ 2.63	\$ 7.90
Codo 90° 2"	5	und.	\$ 1.96	\$ 9.80
Tee 5"	5	und.	\$ 8.04	\$ 40.18
Tee 4"	4	und.	\$ 5.11	\$ 20.44
Tee 3"	15	und.	\$ 3.78	\$ 56.70
Tee 2"	16	und.	\$ 2.52	\$ 40.32
Reducción 5" a 4"	1	und.	\$ 10.70	\$ 10.70

Reducción 5" a 3"	8	und.	\$ 7.77	\$ 62.16
Reducción 4" a 3"	1	und.	\$ 3.53	\$ 3.53
Reducción 4" a 2"	1	und.	\$ 3.57	\$ 3.57
Reducción 3" a 2"	6	und.	\$ 2.44	\$ 14.62
Manguera 5" (m)	1300	rollo	\$ 37.00	\$ 801.67
Manguera 4" (m)	500	rollo	\$ 14.73	\$ 122.75
Manguera 3" (m)	1500	rollo	\$ 9.57	\$ 143.55
Manguera 2" (m)	800	rollo	\$ 7.38	\$ 59.04
			Subtotal	\$ 1 880.77

El costo de instalación se considera como 20% del costo de tubería, entonces:

$$\text{Costo de instalación} = 20\% \times \$ 1\,1027.01$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 225.4$$

Tenemos los siguientes gastos:

- Mantenimiento de la red
- Costo de energía
- Horas de operación por día: h/día
- Conversión hp a kWh: 0.7457 kW/hp

Costo anual de mantenimiento de la red:

$$\text{Costo de mantenimiento} = 7\% \times \$ 1\,1027.01$$

$$\text{Costo de mantenimiento} = \$ 78.89 \text{ /año}$$

### 3.2.12.1.8 Flujo de caja

Tabla 3.23 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2

Ingresos por ventas			Ia/3años	\$ 226 800
Item	Cantidad	Capacidad	Costos/h alquiler	Horas recorridas
<b>Volquetes</b>	4	7 m <sup>3</sup>	35	1.5
			Subtotal	\$ 210.00
			Total mensual	\$ 6 300.00

Tabla 3.24 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 2

<b>Horas de trabajo al día</b>	<b>h/día</b>	<b>12</b>
<b>Costo de kW/h</b>	<b>\$/kwh</b>	<b>\$ 0.0823</b>
<b>Consumo de energía</b>	<b>kWh/mes</b>	<b>\$ 19 500</b>

Tabla 3.25 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2

<b>INSUMOS</b>	
Señalética	\$ 940.80
Accesorios de oficina	\$ 568.37
Equipo de protección personal	\$ 1,257.85
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8,301.06</b>
<b>SUELDO MINA</b>	
Capataz	\$ 2 513.40
Perforista	\$ 2 826.67
Ayudante perforista	\$ 3 024.97
Obrero mina	\$ 5 172.83
Operador winche	\$ 1 983.20
Operador locomotora	\$ 2 093.57
Polvorines	\$ 1 852.67
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 58 401.93</b>
<b>SUELDO ADMINISTRATIVO</b>	
Jefe de geología	\$ 1 386.00
Jefe de SSO	\$ 1 286.00
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8 016.00</b>
<b>OBRAS ANEXAS</b>	
Herramientas	\$ 977.00
Insumos de perforación	\$ 5 095.00
Repuestos de perforadora	\$ 3 855.60
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 29 782.80</b>

Tabla 3.26 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 2

<b>IMPOSICIONES</b>	
<b>Patente</b>	
# Hectáreas	13
%	2
SBU	\$386.00

20% SBU	7.72
<b>Total</b>	\$301.08
<b>Regalías</b>	
%	3
Subtotal	\$104,501.79
<b>Total</b>	\$9,405.16

Tabla 3.27 Flujo de caja para el escenario 2

<b>COMPAÑÍA MINERA ASOPROMIN S.A.</b>	
<b>FLUJO DE CAJA</b>	
<b>Inversión inicial</b>	
Materiales	\$ 1 880.77
Mantenimiento de la red	\$ 236.67
Costo de energía	\$ 4 814.55
Máquina termofusora	\$ 7 000
Inversión requerida en implementación	\$ 225.4
Inversión fija	
Inversión inicial + inversión implementación	\$ 14 157.39
Producción mensual (ton)	2600
Ley media ponderada (gr Au/ton)	3.5
Precio oro (\$/gr)	48.12
Tiempo de proyección del proyecto (años)	3
Tasa de interés	12%
Amortización	\$ 4 719.13
<b>Ingresos</b>	
Ingreso por ventas	\$ 226 800
<b>Egresos</b>	
Insumos	\$ 8 301.06
Sueldo mina	\$ 58 401.93
Sueldo administrativo	\$ 8 016.00
Obras anexas	\$ 29 782.80
Subtotal	\$ 104 501.79
Flujo efectivo neto	\$ 122 298.21
<b>Imposiciones</b>	
Patente	\$ 301.08
Regalías	\$ 9 405.16

Subtotal	\$ 116 474.89
UTILIDAD BRUTA	\$ 117 579.08
UTILIDAD DESPUES DE IMPOSICIONES	\$ 1 104.19
<b>RENTABILIDAD (%)</b>	7.80%

### 3.2.12.2 Escenario 3

#### 3.2.12.2.1 Cálculo de longitudes equivalentes

Se debe asumir diámetros para los ramales de la red propuesta:

- Diámetro de la línea principal: 4''
- Diámetro de línea secundaria: 3'' y 2''

Se tiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 3.28 Longitudes equivalentes para el escenario 3

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. (pulg)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	VC	C90°	T	R43	R42	R32	Long. Equiv. (ft)	Long. Tot. H (ft)	Long. Tot. V (ft)
1	O	Acceso A	Socavón	4	1002.59		3		2				23.1	1025.68	
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	77.85						1		3.7	81.50	
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	59.68						1		3.7	63.33	
4	O	Acceso B	Socavón	4	869.75		1		1				10.1	879.85	
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	81.43						1		3.7	85.08	
6	O	Acceso C	Socavón	4	535.3		2		2				20.2	555.51	
7	O	X Norte	Frontón	2	44.29						1		3.7	47.94	
8	O	X Sur	Frontón	2	305.05						1		3.7	308.70	
9	O	Acceso D	Socavón	4	157.35				1				7.2	164.57	
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	665.5		2		2		2		111.3	776.77	
11	O	CPA P1	Crucero	2	121.65		1		1		1		9.4	131.09	
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	4	389.4		1		1		1		13.8	403.16	
13	O	CGE	Crucero	2	86.45		1		1		1		9.4	95.89	
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	130.31		1		1		1		13.8	144.07	
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	4	376.28		2		2		2		27.5	403.80	
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	2	344.36		2		2				11.6	355.93	
17	O	Acceso E	Socavón	2	115.85		1	1	1		1		15.6	131.49	
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	114.83		1						1.7	116.48	
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	161.48		2						3.3	164.79	
20	P	Cristina Sur	Chimenea	3		134.51	1	1	1	1			19.8		154.34
21	P	Cristina Sur	Crucero	2	96.49		1		1				5.8	102.28	
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	3	1299.05		3		3			3	50.8	1349.84	
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	3		134.51	1	1	1				17.1		151.62

24	Q	Cristina Sur	Frontón	3	1536.81	4	2	4	4	61.8	1598.63
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	180.71	2	1	2	1	20.5	201.25
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	52.49	1	1	1		16.1	68.61
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	214.9	1		1		5.8	220.69
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	637.76	2		2		11.6	649.33
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	95.14	1	1	1		12.0	107.13
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	242.88	1	1	1		12.0	254.87
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	1310.73	5		5		28.9	1339.66
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	97.6	2		2		11.6	109.17
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	167.36		2			12.4	179.76
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	13.12	1	1	1		16.1	29.24
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	397.31	2		2		11.6	408.88
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	62.34	1	1	1		16.1	78.46
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	391.08	3		3		17.4	408.44
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	135.1		2			12.4	147.50

### **3.2.12.2.2 Pérdidas de presión en mangueras de toda la mina**

Se muestra el procedimiento de cálculo con la línea principal del escenario 3.

Se tienen los siguientes datos:

Caudal de aire: 1185 cfm

Longitud de tubería: 1025.68 ft

Diámetro interno de tubería: 4.33 in

Temperatura: 73.4 °F

Presión atmosférica: 12.9 psi

Presión de entrada: 115 psi

Viscosidad absoluta: 0.018 cp

Constante de gas para el aire: 53.34 ft lbf/ (lbm °R)

Constante experimental: 32.174 ft lbf/ (lbf s<sup>2</sup>)

Rugosidad absoluta: 0.00015 ft

Factor de deterioro: 35%

Tabla 3.29 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) para el escenario 3

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real Vertical (ft)	Long. Equiv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	$\Delta$ PH (psi)	$\Delta$ PV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	4	4.33	1002.59		23.1	1025.68		1185	115	113.20	1.804		1.80	1.80
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	2.48	77.85		3.7	81.50		79	113.20	113.18	0.0141		0.01	1.82
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	2.48	59.68		3.7	63.33		79	113.18	113.17	0.011		0.01	1.83
4	O	Acceso B	Socavón	4	4.33	869.75		10.1	879.85		1027	113.17	111.98	1.1891		1.19	3.02
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	2.48	81.43		3.7	85.08		79	111.98	111.97	0.0149		0.01	3.03
6	O	Acceso C	Socavón	4	4.33	535.30		20.2	555.51		948	111.97	111.32	0.65		0.65	3.68
7	O	X Norte	Frontón	2	2.48	44.29		3.7	47.94		79	111.32	111.31	0.0084		0.01	3.69
8	O	X Sur	Frontón	2	2.48	305.05		3.7	308.70		79	111.31	111.25	0.0543		0.05	3.75
9	O	Acceso D	Socavón	4	4.33	157.35		7.2	164.57		790	111.25	111.12	0.136		0.14	3.88
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	665.50		111.3	776.77		79	111.12	111.11	0.0090		0.01	3.89
11	O	CPA P1	Crucero	2	2.48	121.65		9.4	131.09		79	111.11	111.09	0.0231		0.02	3.91
12	O	Cristina Sur -B	Frontón	4	4.33	389.40		13.8	403.16		79	111.09	111.08	0.0047		0.00	3.92
13	O	CGE	Crucero	2	2.48	86.45		9.4	95.89		79	111.08	111.06	0.0169		0.02	3.94
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	4.33	130.31		13.8	144.07		79	111.06	111.06	0.0017		0.00	3.94
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	4	4.33	376.28		27.5	403.80		79	111.06	111.06	0.0047		0.00	3.94
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	2	2.48	344.36		11.6	355.93		79	111.06	111.00	0.0628		0.06	4.00
17	O	Acceso E	Socavón	2	2.48	115.85		15.6	131.49		553	111.00	110.05	0.9450		0.95	4.95
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		1.7	116.48		79	110.05	110.03	0.0207		0.02	4.97
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	2.48	161.48		3.3	164.79		79	110.03	110.00	0.0293		0.03	5.00
20	P	Cristina Sur	Chimenea	3	3.54		134.51	19.8		154.34	395	110.00	109.91		0.0948	0.09	5.09

21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49		5.8	102.28	79	109.91	109.89	0.0182	0.02	5.11	
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	3	3.54	1299.05		50.8	1349.84	79	109.89	109.85	0.0420	0.04	5.15	
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	3	3.54		134.51	17.1	151.62	316	109.85	109.78		0.0610	0.06	5.22
24	Q	Cristina Sur	Frontón	3	3.54	1536.81		61.8	1598.63	79	109.78	109.73	0.05	0.05	5.27	
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71		20.5	201.25	79	109.73	109.70	0.036	0.04	5.30	
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		52.49	16.1	68.61	237	109.70	109.60		0.0965	0.10	5.40
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90		5.8	220.69	79	109.60	109.56	0.0394	0.04	5.44	
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76		11.6	649.33	79	109.56	109.45	0.116	0.12	5.55	
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		95.14	12.0	107.13	79	110.00	109.98		0.0191	0.02	5.02
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	242.88		12.0	254.87	158	109.98	109.82	0.165	0.17	5.18	
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	2.48	1310.73		28.9	1339.66	79	109.82	109.58	0.2387	0.24	5.42	
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	2.48	97.60		11.6	109.17	79	109.58	109.56	0.0195	0.02	5.44	
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36		12.4	179.76	79	109.56	109.53	0.0321	0.03	5.47	
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		13.12	16.1	29.24	79	109.53	109.52		0.0052	0.01	5.48
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31		11.6	408.88	79	109.52	109.45	0.073	0.07	5.55	
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		62.34	16.1	78.46	79	109.45	109.43		0.0140	0.01	5.57
37	M	Cristina Sur Pozo - A	Frontón	2	2.48	391.08		17.4	408.44	79	109.43	109.36	0.073	0.07	5.64	
38	M	Cristina Sur Pozo - B	Frontón	2	2.48	135.10		12.4	147.50	79	109.36	109.33	0.0264	0.03	5.67	

### 3.2.12.2.3 Pérdidas de presión en mangueras de subniveles

Tabla 3.30 Caída de presión en mangueras en subniveles para el escenario 3

Descripción	Símbolo	Cantidad
Caudal de aire	Q	242.61 cfm
Longitud de la manguera	L	66 ft
Diámetro de la manguera	D	1.26 in
Área transversal de la manguera	A	1.2469 in <sup>2</sup>
Presión de entrada	P1	109.33 psi
Temperatura interna	T	73.4 °F
Presión atmosférica	Pa	12.9 psi
Viscosidad absoluta	va	0.018 cp
Constante de gas para el aire	Rc	53.34 ft lbf/(lbm °R)
Rugosidad relativa	$\epsilon/D$	0.00015
Constante experimental	g	35 ft lbf/(lbm s <sup>2</sup> )
Ratio de compresión	r	9.4752
Caudal de aire	Q	25.6048 cfm
Velocidad del aire	v	49.2834 fps
Temperatura absoluta	To	533.09 °R
Densidad del fluido	$\rho$	0.6190 lbm/ft <sup>3</sup>
Viscosidad relativa	v	0.0290 cp ft <sup>3</sup> /lbm
Número de Reynolds	R	264579.97
Factor de rugosidad de Moody	f	0.00143
Caída de presión	$\Delta p$	2.35 psi
Caída de presión ajustada	$\Delta p$	3.1701 psi
Presión de salida	P2	106.16 psi

Esta presión final satisface los requerimientos de funcionamiento de la máquina perforada (106.16 psi < 91.4 psi).

### 3.2.12.2.4 Ajuste de pérdidas de presión en mangueras de subniveles

Como se vio en el punto 3.2.11.4, la presión de salida de la tubería debe ser 94.99 psi para que la máquina perforadora opere con 91.4 psi. Con estos datos vamos a corregir los cálculos realizados en el punto anterior para el escenario 3 en el punto crítico (línea 38 – Cristina Sur Pozo – B).

### 3.2.12.2.5 Presión de entrada

Tabla 3.31 Caída de presión (Fórmula Darcy-Weisbach) mejorada para el escenario 3

Nro.	Nivel	Veta	Descrip.	Diám. N (in)	Diám. R (in)	Long. Real H. (ft)	Long. Real V. (ft)	Long. Equiv. (ft)	Long. Total H (ft)	Long. Total V (ft)	Caudal (cfm)	P entrada (psi)	P salida (psi)	ΔPH (psi)	ΔPV (psi)	Caída de P Tot. (psi)	Caída de P Acum. (psi)
1	O	Acceso A	Socavón	4	4.33	1002.59		23.1	1025.68		1185	101.36	99.34	2.017		2.02	2.02
2	O	Preventora Norte	Frontón	2	2.48	77.85		3.7	81.50		79	99.34	99.33	0.0159		0.02	2.03
3	O	Preventora Sur	Frontón	2	2.48	59.68		3.7	63.33		79	99.33	99.31	0.012		0.01	2.05
4	O	Acceso B	Socavón	4	4.33	869.75		10.1	879.85		1027	99.31	97.98	1.334		1.33	3.38
5	O	Vetilla Sur	Frontón	2	2.48	81.43		3.7	85.08		79	97.98	97.96	0.0168		0.02	3.40
6	O	Acceso C	Socavón	4	4.33	535.30		20.2	555.51		948	97.96	97.23	0.7303		0.73	4.13
7	O	X Norte	Frontón	2	2.48	44.29		3.7	47.94		79	97.23	97.22	0.0095		0.01	4.14
8	O	X Sur	Frontón	2	2.48	305.05		3.7	308.70		79	97.22	97.16	0.0612		0.06	4.20
9	O	Acceso D	Socavón	4	4.33	157.35		7.2	164.57		790	97.16	97.01	0.153		0.15	4.35
10	O	Cristina Sur - A	Frontón	4	4.33	665.50		111.3	776.77		79	97.01	97.00	0.0102		0.01	4.36
11	O	CPA P1	Crucero	2	2.48	121.65		9.4	131.09		79	97.00	96.97	0.0260		0.03	4.39
12	O	Cristina Sur - B	Frontón	4	4.33	389.40		13.8	403.16		79	96.97	96.97	0.0053		0.0053	4.39
13	O	CGE	Crucero	2	2.48	86.45		9.4	95.89		79	96.97	96.95	0.0191		0.02	4.41
14	O	Cristina Sur - C	Frontón	4	4.33	130.31		13.8	144.07		79	96.95	96.95	0.0019		0.0019	4.41
15	O	Cristina Sur - C A	Frontón	2	2.48	376.28		27.5	403.80		79	96.95	96.87	0.0803		0.08	4.49
16	O	Cristina Sur - C B - CH	Frontón	4	4.33	344.36		11.6	355.93		79	96.87	96.86	0.0047		0.00	4.50
17	O	Acceso E	Socavón	2	2.48	115.85		15.6	131.49		553	96.86	95.80	1.065		1.07	5.56
18	O	Jenn Norte	Frontón	2	2.48	114.83		1.7	116.48		79	95.80	95.77	0.023		0.02	5.59
19	O	Jenn Sur	Frontón	2	2.48	161.48		3.3	164.79		79	95.77	95.74	0.0331		0.03	5.62
20	P	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		134.51	19.8		154.34	395	95.74	95.08		0.656	0.66	6.28

21	P	Cristina Sur	Crucero	2	2.48	96.49		5.8	102.28	79	95.08	95.06	0.021	0.02	6.30	
22	P	Cristina Sur - A	Frontón	2	2.48	1299.05		50.8	1349.84	79	95.06	94.79	0.2734	0.27	6.57	
23	Q	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		134.51	17.1	151.62	316	94.79	94.37		0.4224	0.42	6.99
24	Q	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	1536.81		61.8	1598.63	79	94.37	94.04	0.326	0.33	7.32	
25	Q	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	180.71		20.5	201.25	79	94.04	94.04		0.00	7.32	
26	R	Cristina Sur	Chimenea	2	2.48		52.49	16.1	68.61	237	94.04	93.93		0.111	0.11	7.43
27	R	Cristina Sur B	Crucero	2	2.48	214.90		5.8	220.69	79	93.93	93.89	0.045	0.05	7.47	
28	R	Cristina Sur	Frontón	2	2.48	637.76		11.6	649.33	79	93.89	93.75	0.132	0.13	7.61	
29	Ñ	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		95.14	12.0	107.13	79	95.74	95.72		0.022	0.02	5.64
30	Ñ	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	242.88		12.0	254.87	158	95.72	95.53	0.187	0.19	5.83	
31	Ñ	Cristina Norte - A	Frontón	2	2.48	1310.73		28.9	1339.66	79	95.53	95.26	0.2701	0.27	6.10	
32	Ñ	Cristina Norte - A2	Frontón	2	2.48	97.60		11.6	109.17	79	95.26	95.24	0.0221	0.02	6.12	
33	Ñ	Cristina Norte - B	Frontón	2	2.48	167.36		12.4	179.76	79	95.24	95.20	0.036	0.04	6.16	
34	N	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		13.12	16.1	29.24	79	95.20	95.20		0.0059	0.01	6.16
35	N	Cristina Sur Pozo	Frontón	2	2.48	397.31		11.6	408.88	79	95.20	95.11	0.083	0.08	6.25	
36	M	Cristina Sur Pozo	Pozo	2	2.48		62.34	16.1	78.46	79	95.11	95.10		0.0159	0.02	6.26
37	M	Cristina Sur Pozo -A	Frontón	2	2.48	391.08		17.4	408.44	79	95.10	95.02	0.0827	0.08	6.34	
38	M	Cristina Sur Pozo -B	Frontón	2	2.48	135.10		12.4	147.50	79	95.02	94.99	0.0299	0.03	6.37	

### 3.2.12.2.6 Cálculo de la potencia del compresor

Potencia teórica del compresor (Hp):

$$r = \frac{101.36 \text{ psi} + 12.9 \text{ psi}}{12.9 \text{ psi}}$$

$$r = 8.8574$$

$$\text{Hp} = 3.084 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2} \times 12.9 \text{ psi} \times (8.8574^{0.1415} - 1) \times \frac{1185 \text{ cfm}}{101.36 \text{ cfm}}$$

$$\text{Hp} = 168$$

Se divide la potencia teórica entre la eficiencia de la máquina para hallar la potencia real del compresor:

$$\text{bhp} = \frac{\text{hp}}{\text{ef}}$$

$$\text{bhp} = 168 \text{ hp} \times 85\%$$

$$\text{bhp} = 143 \text{ Hp}$$

### 3.2.12.2.7 Evaluación económica

Se presenta el siguiente cuadro resumen con el total de materiales a instalar en la red propuesta, costos unitarios de los materiales y el costo de la instalación:

Tabla 3.32 Materiales a instalar en la red propuesta

Descripción	Cantidad	Unid.	Precio Unitario	Costo
Válvula compuerta 4"	12	und.	\$ 14.95	\$ 179.42
Válvula compuerta 3"	9	und.	\$ 10.57	\$ 95.13
Válvula compuerta 2"	31	und.	\$ 4.31	\$ 133.67
Codo 90° 3"	4	und.	\$ 2.63	\$ 10.53
Codo 90° 2"	11	und.	\$ 1.96	\$ 21.56
Tee 4"	12	und.	\$ 5.11	\$ 61.32
Tee 3"	9	und.	\$ 3.78	\$ 34.02
Tee 2"	28	und.	\$ 2.52	\$ 70.56
Reducción 4" a 3"	1	und.	\$ 3.53	\$ 3.53
Reducción 4" a 2"	14	und.	\$ 3.57	\$ 49.98
Reducción 3" a 2"	8	und.	\$ 2.44	\$ 19.49
Manguera 4" (m)	1300	rollo	\$ 14.73	\$ 319.15

Manguera 3" (m)	950	rollo	\$ 9.57	\$ 90.92
Manguera 2" (m)	1700	rollo	\$ 7.38	\$ 125.46
			Subtotal	\$ 1 214.74

El costo de instalación se considera como 20% del costo de tubería, entonces:

$$\text{Costo de instalación} = 20\% \times \$ 535.53$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 107.11$$

Tenemos los siguientes gastos:

- Mantenimiento de la red
- Costo de energía
- Horas de operación por día: h/día
- Conversión hp a kWh: 0.7457 kW/hp

Costo anual de mantenimiento de la red:

$$\text{Costo de mantenimiento} = 7\% \times \$ 535.53$$

$$\text{Costo de mantenimiento} = \$ 37.49 /\text{año}$$

### 3.2.12.2.8 Flujo de caja

Tabla 3.33 Ingresos por ventas de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3

<b>Ingresos por ventas</b>			<b>Ia/3años</b>	<b>\$ 226 800</b>
<b>Item</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Costos/h alquiler</b>	<b>Horas recorridas</b>
<b>Volquetes</b>	4	7 m <sup>3</sup>	35	1.5
			Subtotal	\$ 210.00
			Total mensual	\$ 6 300.00

Tabla 3.34 Egresos de consumo de energía para la mina O Nivel del escenario 3

<b>Horas de trabajo al día</b>	h/día	12
<b>Costo de kW/h</b>	\$/kwh	\$ 0.0823
<b>Consumo de energía</b>	kWh/mes	\$ 19 500

Tabla 3.35 Total de egresos de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3

<b>INSUMOS</b>	
Señalética	\$ 940.80
Accesorios de oficina	\$ 568.37
Equipo de protección personal	\$ 1,257.85
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8,301.06</b>
<b>SUELDO MINA</b>	
Capataz	\$ 2 513.40
Perforista	\$ 2 826.67
Ayudante perforista	\$ 3 024.97
Obrero mina	\$ 5 172.83
Operador winche	\$ 1 983.20
Operador locomotora	\$ 2 093.57
Polvorines	\$ 1 852.67
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 58 401.93</b>
<b>SUELDO ADMINISTRATIVO</b>	
Jefe de geología	\$ 1 386.00
Jefe de SSO	\$ 1 286.00
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8 016.00</b>
<b>OBRAS ANEXAS</b>	
Herramientas	\$ 977.00
Insumos de perforación	\$ 5 095.00
Repuestos de perforadora	\$ 3 855.60
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 29 782.80</b>

Tabla 3.36 Obligaciones legales de la mina O Nivel para los 3 años de proyección del sistema de aire comprimido del escenario 3

<b>IMPOSICIONES</b>	
<b>Patente</b>	
# Hectáreas	13
%	2
SBU	\$386.00
20% SBU	7.72
<b>Total</b>	<b>\$301.08</b>
<b>Regalías</b>	
%	3
Subtotal	\$104,501.79
<b>Total</b>	<b>\$9,405.16</b>

Tabla 3.37 Flujo de caja del escenario 3

<b>COMPAÑÍA MINERA ASOPROMIN S.A.</b>	
<b>FLUJO DE CAJA</b>	
<b>Inversión inicial</b>	
Materiales	\$ 1 214.74
Mantenimiento de la red	\$ 112.46
Costo de energía	\$ 4 814.55
Máquina termofusora	\$ 7 000
Inversión requerida en implementación	\$ 107.11
<b>Inversión fija</b>	
Inversión inicial + inversión implementación	\$ 13 248.85
Producción mensual (ton)	2600
Ley media ponderada (gr Au/ton)	3.5
Precio oro (\$/gr)	48.12
Tiempo de proyección del proyecto (años)	3
Tasa de interés	12%
Amortización	\$ 4 416.28
<b>Ingresos</b>	
Ingreso por ventas	\$ 226 800
<b>Egresos</b>	
Insumos	\$ 8 301.06
Sueldo mina	\$ 58 401.93
Sueldo administrativo	\$ 8 016.00
Obras anexas	\$ 29 782.80
Subtotal	\$ 104 501.79
Flujo efectivo neto	\$ 122 298.21
<b>Imposiciones</b>	
Patente	\$ 301.08
Regalías	\$ 9 405.16
Subtotal	\$ 116 474.89
UTILIDAD BRUTA	\$ 117 881.93
UTILIDAD DESPUES DE IMPOSICIONES	\$ 1 407.03
<b>RENTABILIDAD (%)</b>	10.62%

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de alternativas

El diseño óptimo de un sistema de aire comprimido busca evitar la mayor cantidad de pérdidas para no afectar a la productividad de la actividad de exploración y explotación, para ellos debe existir un correcto abastecimiento de aire a las máquinas perforadoras, con el caudal y la presión de aire necesarios para que la máquina pueda operar. Además de ello, se debe realizar una evaluación económica para que exista un equilibrio entre el correcto diseño y la inversión para el sistema.

Bajo esta premisa se diseñaron 3 escenarios de red de aire comprimido, cada uno con diferentes variables de diámetros para tuberías y accesorios y caudal. Todas estas cumplen con abastecer a los frentes de exploración y explotación.

El diseño óptimo es aquel que además de abastecer con la presión y el caudal de aire necesarios, también genera mayor rentabilidad económica.

#### 4.2 Descripción de escenarios calculados

##### 4.2.1 Escenario 1

La tubería que va por la línea principal tiene un diámetro de 4'' y la tubería que va a los diferentes subniveles al norte y al sur tiene un diámetro de 2''.

En el punto 3.2.11 se observan los cálculos para las pérdidas de presión. El punto con mayor caída de presión se tiene en el nivel R en el frontón de Cristina Sur, el compresor debe trabajar de tal manera que abastezca de aire a en este punto: la presión de salida del compresor es de 102.45 psi, con una potencia de 142 Hp. Se observa también que para los niveles más lejanos (R y M) de la mina O Nivel, deben tener una presión de:

Nivel R Crucero Cristina Sur B: 95.17 psi

Frontón Cristina Sur: 95.12 psi

Nivel M Frontón Cristina Sur Pozo – A: 96.3 psi

Frontón Cristina Sur Pozo – B: 96.22 psi

En la evaluación económica se tiene como resultado de inversión total (materiales, mantenimiento de la red, costo de energía, máquina termofusora y la implementación del sistema) con un total de \$ 13 278.54

Como utilidad bruta se tiene un valor de \$ 117 872.03, dando una rentabilidad del 10.52%.

#### **4.2.2 Escenario 2**

La tubería que va por la línea principal tiene un diámetro de 5'' y la tubería que va a los diferentes subniveles al norte y al sur tienen un diámetro de 4'', 3'' y 2''.

En el punto 3.2.11 se observan los cálculos para las pérdidas de presión. El punto con mayor caída de presión se tiene en el nivel R en el frontón de Cristina Sur, el compresor debe trabajar de tal manera que abastezca de aire a en este punto: la presión de salida del compresor es de 97.05 psi, con una potencia de 146 Hp. Se observa también que para los niveles más lejanos (R y M) de la mina O Nivel, deben tener una presión de:

Nivel R Crucero Cristina Sur B: 95.17 psi

Frontón Cristina Sur: 95.13 psi

Nivel M Frontón Cristina Sur Pozo – A: 95.30 psi

Frontón Cristina Sur Pozo – B: 95.22 psi

En la evaluación económica se tiene como resultado de inversión total (materiales, mantenimiento de la red, costo de energía, máquina termofusora y la implementación del sistema) con un total de \$ 14 157.39.

Como utilidad bruta se tiene un valor de \$ 117 579.08 dando una rentabilidad del 7.80%.

#### **4.2.3 Escenario 3**

La tubería que va por la línea principal tiene un diámetro de 4'' y la tubería que va a los diferentes subniveles al norte y al sur tienen un diámetro de 3'' y 2''.

En el punto 3.2.11 se observan los cálculos para las pérdidas de presión. El punto con mayor caída de presión se tiene en el nivel R en el frontón de Cristina Sur, el compresor debe trabajar de tal manera que abastezca de aire a en este punto: la presión de salida del compresor es de 101.36 psi, con una potencia de 143 Hp. Se observa también que para los niveles más lejanos (R y M) de la mina O Nivel, deben tener una presión de:

Nivel R          Crucero Cristina Sur B: 93.93 psi

Frontón Cristina Sur: 93.89 psi

Nivel M          Frontón Cristina Sur Pozo – A: 95.10 psi

Frontón Cristina Sur Pozo – B: 95.02 psi

En la evaluación económica se tiene como resultado de inversión total (materiales, mantenimiento de la red, costo de energía, máquina termofusora y la implementación del sistema) con un total de \$ 13 248.85.

Como utilidad bruta se tiene un valor de \$ 117 881.93 dando una rentabilidad del 10.62%.

Como se aprecia en los resultados de los 3 escenarios anteriormente descritos, la opción 3 es la más óptima porque además de abastecer a todos los frentes de exploración y explotación con 91.4 psi que es lo requerido por la máquina perforadora, también brinda una mayor rentabilidad en comparación a las otras dos opciones. La diferencia de rentabilidad entre el escenario 1 y 3 es relativamente baja, varía por el costo de material para la inversión y las presiones y caudales que llegan a los frentes.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- El sistema actual de aire comprimido en O Nivel se encuentra en condiciones deterioradas, la mina lleva más de 30 años en producción continua, lo que ha hecho que la instalación de la red de aire comprimido tenga un sin número de fugas, pérdidas por fricción y presión en las uniones de cada una de las tuberías antiguas, eso debido a que la mina ha pasado por diferentes implementaciones por mejorar su sistema.
- En el escenario 3, la diferencia de presión entre la salida del compresor (115 psi) y la presión de entrada para la labor en el punto con mayor caída de presión (109.56 psi), es de 5.55 psi, esto se encuentra dentro del rango aconsejado (10 psi) para la presión acumulada.
- De los 3 escenarios calculados para el diseño, se ha escogido la tercera opción como la óptima porque tiene una mejor distribución de diámetros (4'', 3'' y 2''), lo que genera menores pérdidas de presión entre los subniveles, a comparación con el escenario 1 que tiene solamente dos diámetros en su diseño y que genera más pérdidas de presión en las reducciones bruscas entre diámetros de 4'' y 2''.
- La rentabilidad que proporciona el escenario 3 es de 10.62%.
- Para los cálculos realizados se tomó como referencia el compresor que se utiliza actualmente en la mina, dando un valor de presión de entrada de 115 psi, esto con el fin de determinar que el compresor actual es el adecuado para el sistema diseñado en este trabajo.
- El sistema de aire comprimido diseñado abastecerá a la mina con un caudal de 1185 cfm y a una presión ajustada de 101.36 psi, necesarios para las labores en los frentes de exploración y explotación, permitiendo menores costos de inversión en materiales,

mantenimiento y consumo de energía total en los 3 años de proyección de producción. El diseño final se lo indica en los anexos.

- La cotización de tubería fue realizada por la empresa Ditecnia para las tuberías tipo PEAD, pero para los accesorios se relacionó con accesorios de tubería PVC normales, aumentando un 40% en sus precios unitarios.
- El tamaño del pulmón se lo determinó de acuerdo a la capacidad del compresor en cfm, tomando un 20 % de su capacidad. El compresor seleccionado del escenario tres tiene una capacidad de 1185 cfm y de acuerdo a la regla el volumen del pulmón corresponde 237 pies cúbicos.

## Recomendaciones

- Debido a la evolución tecnológica, una alternativa a los escenarios sería implementar esto con diferentes tipos de tubería en cuanto al material de fabricación, y dependiendo de el tipo de mina y costos, escoger la más óptima.
- Con el avance del tiempo y el avance de las labores mineras, es necesario una evaluación del diseño, la aplicación de métodos más actuales será fundamental en la optimización de nuevos diseños.
- El mantenimiento y la correcta instalación de los nuevos accesorios son indispensables para evitar pérdidas por fugas del caudal del aire.
- Si se requiere la instalación de un pulmón de aire, este debe ser instalado en la parte exterior de la mina, con las medidas de seguridad dispuestas en los respectivos reglamentos.
- En este trabajo se omite el uso del aire comprimido como aire de ventilación, es recomendable la instalación de un sistema de ventilación, esto se debe a que las características de aire son diferentes.
- La evaluación de nuevos equipos neumáticos puede ser fundamental para evitar pérdidas en las labores y representar gastos económicos menores.
- Hay que evitar utilizar manguera de diámetros pequeños (1 pulgada generalmente), estos diámetros representan mayores pérdidas; se debe implementar tubería y accesorios a ciertas distancias en donde el aire sea accesible evitando mayor cantidad de pérdidas.
- Con el crecimiento potencial de la minería en nuestro país, muchas casas comerciales están innovando en sus productos, especialmente para esta rama, en tal caso es necesario analizar las ventajas que proporciona para una posible optimización en el diseño.

## BIBLIOGRAFÍA

Arana Vargas, L., Cayo Veizaga, J., Gutiérrez Alcocer, J. C., Mérida Jailita, J., & Meneces Catarí, C. (2016). Flujo de fluidos en tuberías. Universidad de Aquino, Bolivia., 1–20.

Arenas Vera, V. A. (2017). Diseño óptimo de la red de distribución de aire comprimido para reducir costos en la zona de mariana - unidad operativa arcata. universidad nacional de san agustín.

Atlas Copco. (2011). Manual del aire comprimido. Belgium: Atlas Copco Airpower NV.

Cengel, Y. a., & Boles, M. E. (2012). Termodinámica. In Termodinámica. Retrieved from <http://www.mediafire.com/download/7a3idxrs2gxjbpu/Termodinamica+-+Cengel+7th.pdf>

CRANE. (1992). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tubería (McGraw-Hil). México.

de las Heras Jiménez, S. (2012). Mecánica de Fluidos. Barcelona, España: Salvador de las Heras.

Franquet Bernis, J. M. (2005). Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas. Catalunya.

Howell, J., & Buckius, R. (1990). Principios de termodinámica para ingenieros (McGraw Hil). México D.F.

Martín Bragado, I. (2004). Física General. <https://doi.org/10.1109/EITT.2017.70>

Müller, E. A. (2002). Termodinámica Básica (Consultora). Caracas, Venezuela.

Orozco Flores, M. (1998). Operaciones unitarias (N. Editores, Ed.). México, D.F.: LIMUSA.

R., M. E. S. (Ed.). (1995). *Mecánica de fluidos (Sexta edic)*. Colombia.

Robert L. Mott. (2002). *Mecánica de Fluidos*. In *Mecánica de Fluidos*.  
<https://doi.org/10.1109/CDC.2011.6160241>.

Rodriguez, J. (2000). *Introducción a la Termodinámica. Aplicaciones de Ingeniería*, 1(Edición 2), 1–723. Retrieved from <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Curso Mabe Termo/Introducción a la Termodinamica.pdf>

Valera Negrete, J. (2005). *Apuntes de física general*. México D.F.

## ANEXOS

## Anexo 1.- Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad	
		Sist. Internacional	Sist. Inglés
A	Área	mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	yd <sup>2</sup> , ft <sup>2</sup> , in <sup>2</sup>
cfm	Flujo actual de aire a x m.s.n.m		cfm
Ai	Área interna de tubería, válvula o accesorio	cm <sup>2</sup> , mm <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup> , in <sup>2</sup>
cp	Capacidad calorífica específica a presión constante	J/kg K	
Cp	Capacidad calorífica molar a presión constante	J/K mol	
cv	Capacidad calorífica específica a volumen constante	J/kg K	
Cv	Capacidad calorífica molar a volumen constante	J/K mol	
D	Diámetro interno de tubería, válvula o accesorio	mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup> , in <sup>2</sup>
Do	Diámetro interno de tubería, válvula o accesorio	mm <sup>2</sup> , cm <sup>131</sup>	ft <sup>2</sup> , in <sup>131</sup>
ef	Eficiencia del compresor	S/D	S/D
F	Fuerza	N	lbf
f	Factor de fricción de Moody	S/D	S/D
Fi	Factor de corrección por altitud	S/D	S/D
Fn	Fuerza normal	N	lbf
g	Aceleración de gravedad	m/s <sup>2</sup>	ft lbf/(lbf sec <sup>2</sup> )
H	Diferencia de altura	m	ft
hL	Pérdida de carga debida al flujo del fluido (en altura de fluido)	m	ft
hp	caballos de fuerza		hp
K	Coefficiente de resistencia para válvulas y accesorios	S/D	S/D
L	Longitud de la tubería	m	ft
Le	Longitud equivalente para válvulas y accesorios	m	ft
L/D	Ratio de longitud equivalente para válvulas y accesorios	S/D	S/D
n	Número de moles	S/D	S/D
m	Cantidad de substancia	kg	lbm
M	Masa molar del elemento a cualquier altitud	kg/mol	lbm
P	Presión	Pa	psi
Pabs	Presión absoluta	Pa	psi
Patm	Presión atmosférica	Pa	psi
Pc	Presión de salida del compresor	Pa	psi
Pe	Presión atmosférica a cualquier actitud	Pa	psi
Pf	Presión del fluido	Pa	psi
Pman	Presión manométrica	Pa	psi

Po	Presión de operación	Pa	psi
Ps	Presión atmosférica a condiciones estándar = 14.696	Pa	psi
q12	Cantidad de calor suministrada o removida de un sistema termodinámico	J, N m	ft lbf
Q	Caudal de aire	m <sup>3</sup> /s	cfm
Ql	Caudal de aire libre	m <sup>3</sup> /s	cfm
Qc	Caudal de aire comprimido	m <sup>3</sup> /s	cfm
R	Número de Reynolds	S/D	S/D
r	Ratio de compresión	S/D	S/D
Rc	Constante universal de los gases	J/K mol	ft lbf/(lbm °R)
Rp	Constante del gas particular	J/K mol	ft lbf/(lbm °R)
s	Longitud (desplazamiento)	mm, cm, m	yd, ft, in
T	Temperatura	°C	°F
To	Temperatura absoluta	K	°R
v	Velocidad	m/s	fps
V	Volumen	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>
W	Trabajo	J, N m	ft lbf
Z	Altitud sobre el nivel del mar	m	ft
$\alpha$	Ángulo con respecto a la horizontal	°	°
$\Delta P$	Variación de presión	Pa	psi
$\Delta Ph$	Variación de presión por altitud	Pa	psi
$\varepsilon/D$	Rugosidad relativa	S/D	S/D
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>	lbm/ft <sup>3</sup>
$\nu$	Viscosidad relativa	m/s <sup>2</sup>	cSt, cp/(lbm/ft <sup>3</sup> )
$\theta$	Viscosidad absoluta	Pa s, N s/m <sup>2</sup>	cP

Anexo 2.- Tubería y accesorios para el sistema óptimo de aire comprimido

La tubería PEAD (tubo sistemas de polietileno alta densidad) son livianas lo que beneficia al transporte, carga, descarga, almacenamiento e instalación. Estas tuberías se fabrican con resinas de primera calidad lo que garantiza una larga vida útil en la actividad minera. Además, esta tubería tiene gran flexibilidad, economiza la instalación minimizando el uso de accesorios. Las superficies de las tuberías PEAD son lisas y sin porosidades, así se logran excelentes propiedades de flujo. Tienen un bajo coeficiente de fricción.

PROYECTOS INFRAESTRUCTURA



TUBOSISTEMAS DE POLIETILENO  
ALTA DENSIDAD (PE AD)  
PARA CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE

Cumple Regulaciones de la FDA (Food and Drug Administration).

Fabricado con resinas 100% vírgenes.

Superficie interior lisa.

Liviano y flexible.



Fuente: Ditecnia – Plastigama

El acople de accesorios se hará por termofusión.

## UNIÓN POR TERMOFUSIÓN

Se utiliza una termofusora (plancha de calentamiento) para producir la plastificación del material, luego se retira dicha herramienta y se unen los extremos aplicando una presión adecuada al tipo de unión que estemos realizando.



PARA OTROS DIÁMETROS Y PRESIONES NO ESPECIFICADOS EN ESTE CATÁLOGO, FAVOR CONSULTAR CON NUESTRO DEPARTAMENTO TÉCNICO.

## PROCEDIMIENTO GENERAL PARA UNIONES A TOPE POR TERMOFUSIÓN

1. Revise que la termofusora (plancha de calentamiento) esté limpia y libre de daños.
2. Limpie los extremos de los tubos con un trapo no sintético y alcohol.
3. Determine la presión hidráulica de precalentamiento teniendo en cuenta la presión de arrastre.
4. Tapone los extremos que no está soldando.
5. Mantenga la presión hasta que la tubería se derrita uniformemente formando un reborde o cordón.
6. Mantenga los extremos de los tubos en contacto con la plancha durante el tiempo de calentamiento (especificado en las tablas respectivas).
7. Cumplido el tiempo de calentamiento retire la termofusora (plancha calentadora) y una los extremos de la Tubería rápidamente (máximo 10 seg.).
8. Mantenga esta presión durante el tiempo de enfriamiento mínimo.
9. Permita que la unión se enfríe el tiempo recomendado, antes de retirarla de la máquina.
10. Retire los tramos unidos de tubería de la máquina de termofusión. Deje enfriar mínimo 20 minutos la unión después de retirarla de la máquina, antes de aplicarle esfuerzos de doblado o prueba de presión.



Fuente: Ditecnia – Plastigama.

## Anexo 3.- Proforma para la tubería PEAD.

**DITECUENCA CIA.LTDA**

Av. Americas 15-98 y Los Balcones  
 RUC:0190370038001  
 TELEFAX: 072842965 - 072847296



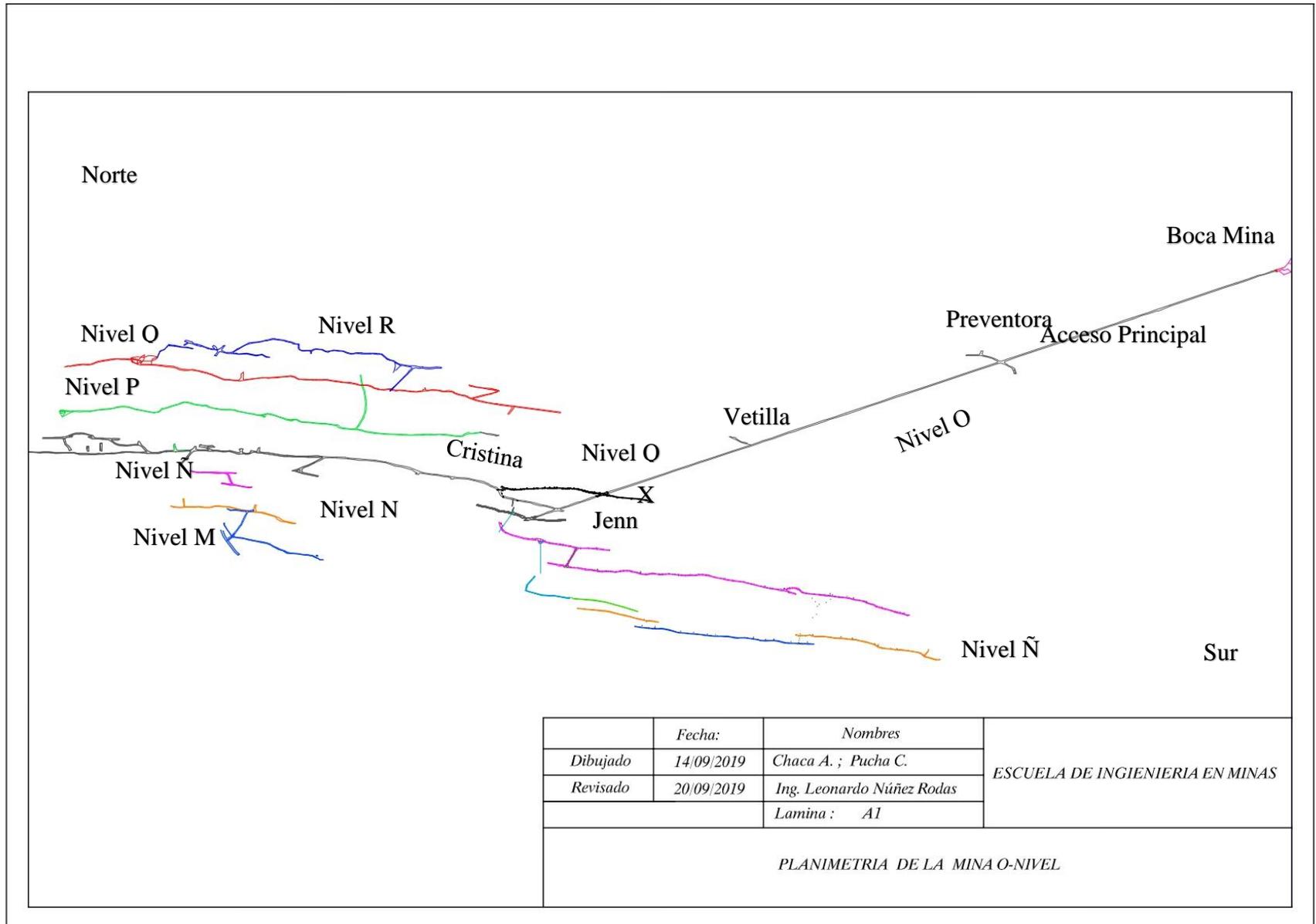
PROFORMA # 151-2019			
<b>CODIGO</b>	A067	<b>FECHA</b>	18 de septiembre de 2019
<b>CLIENTE</b>	ANDREA BELEN CHACA	<b>FORMA DE PAGO</b>	CC
<b>DIRECCION</b>	Cuenca	<b>TIEMPO DE ENTREGA</b>	15 Días
<b>RUC/CEDULA</b>	0	<b>VALIDEZ DE OFERTA</b>	5 días
<b>TELEFONO</b>	0	<b>IMPUESTO</b>	12%

CODIGO	DESCRIPCION	UND	CANTIDAD	V. UNITARIO	V. TOTAL
927038	TUB PEAD PE-100 63mm x 1,00 MPa (145 psi)	rollo	100	7,38	738,00
924610	TUB PEAD PE-100 90mm x 1,00 MPa (145 psi)	rollo	100	9,57	957,00
924859	TUB PEAD PE-100 110mm x 1,00 MPa (145 psi)	rollo	60	14,73	883,80
924362	TUB PEAD PE-100 160mm x 11,80m x 1,00 MPa (145psi) *	und	1	370,00	370,00
<b>OBSERVACIONES</b>				<b>SUBTOTAL</b>	2.948,80
				<b>IVA 12%</b>	353,86
				<b>TRANSP</b>	-
				<b>TOTAL</b>	3.302,66

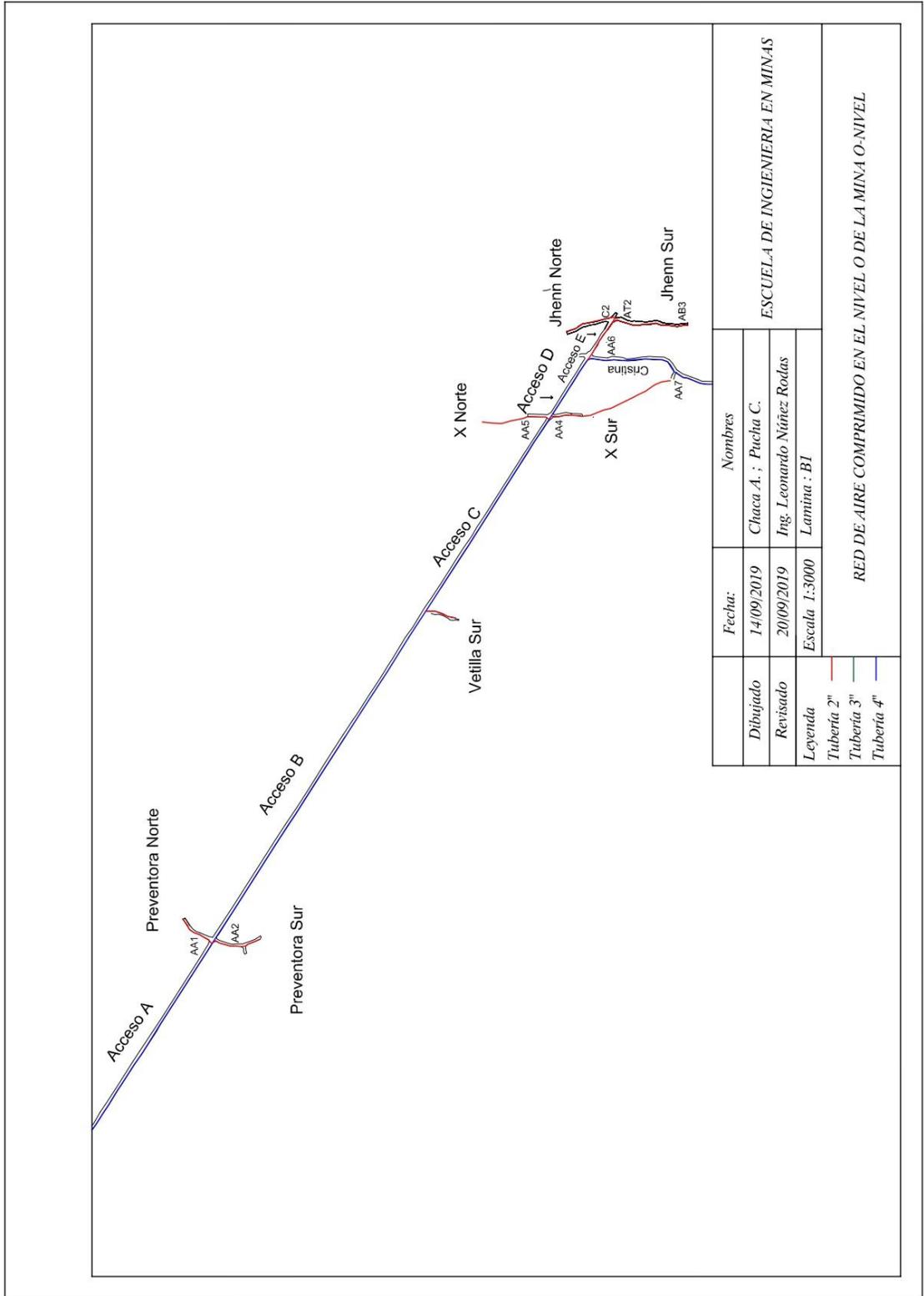


\*\*\* LA TUBERIA OFERTADA ES MARCA PLASTIGAMA  
 \*\*\* EL PRECIO INCLUYE ENTRGA EN OBRA

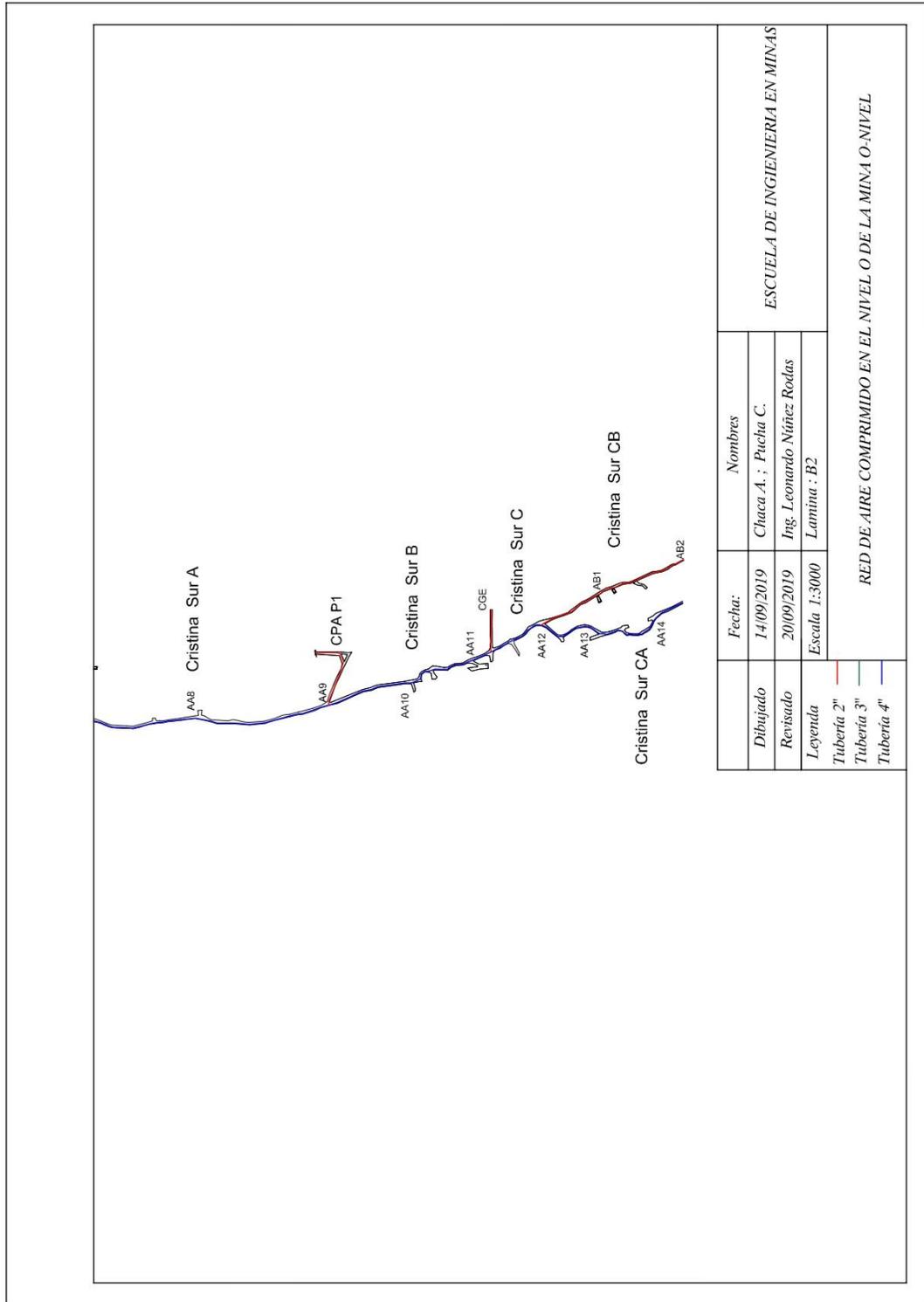
Anexo 4.- Planimetría de la mina (A1).



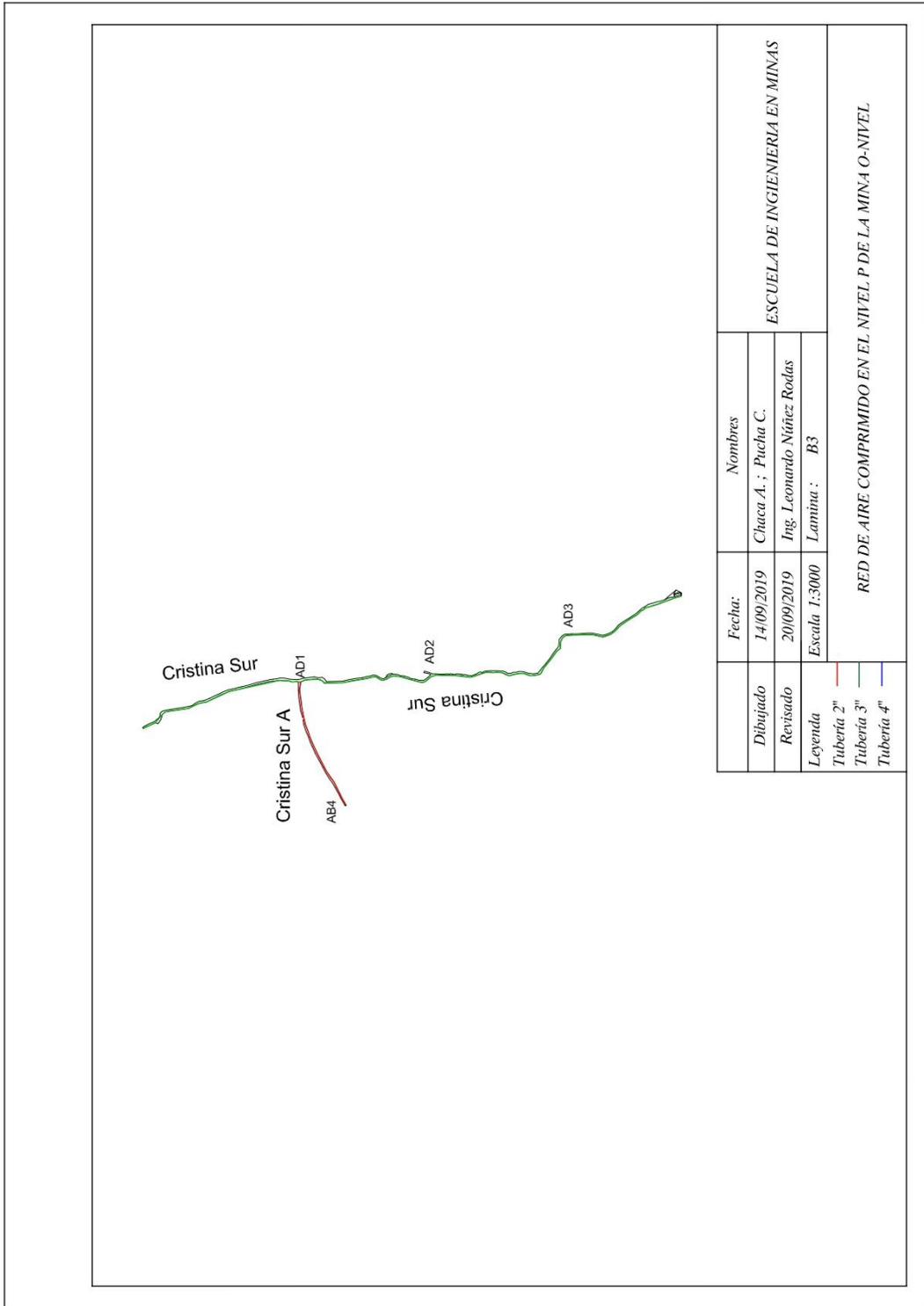
Anexo 5.- Red de aire comprimido en el nivel O, parte A



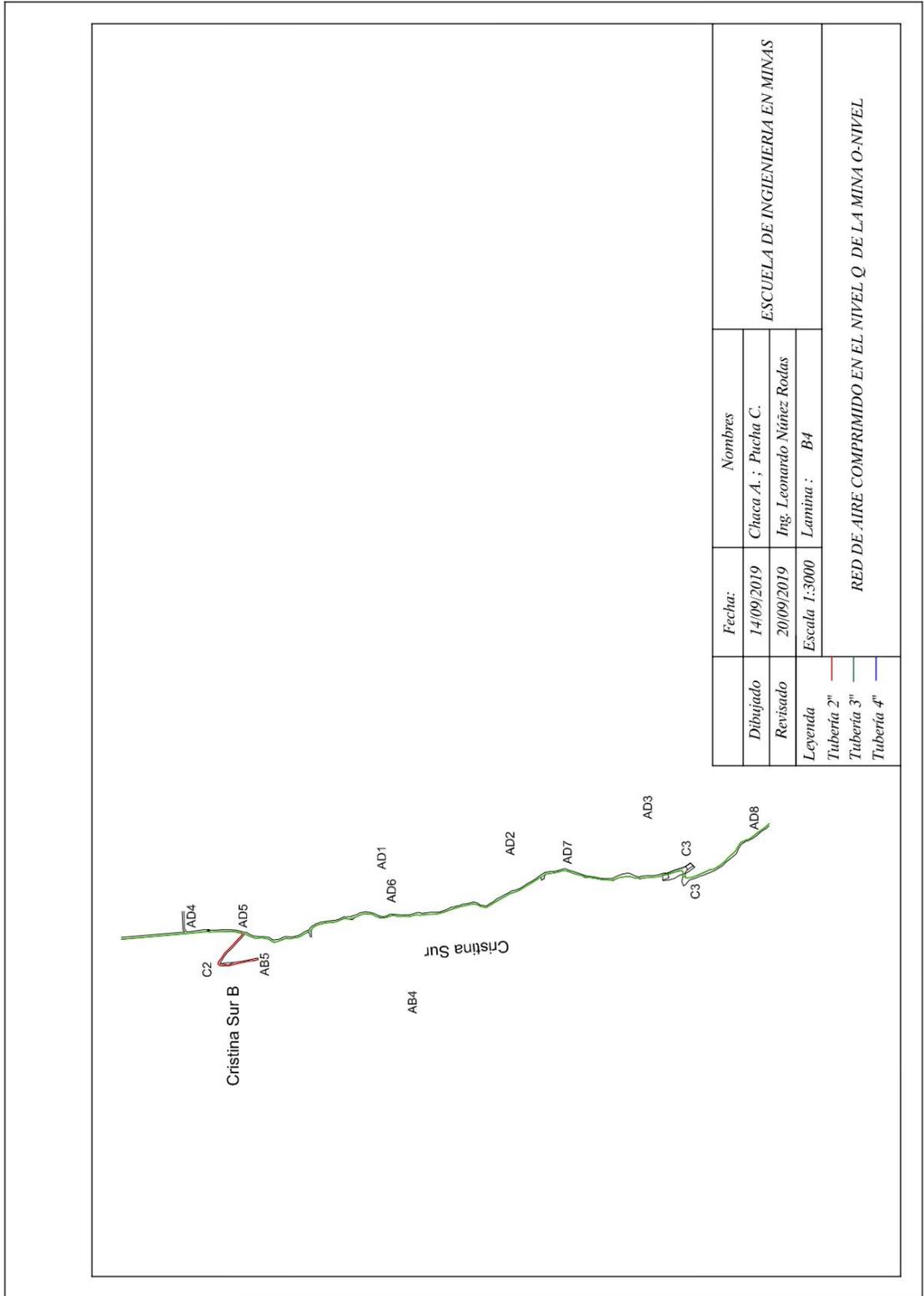
Anexo 6.- Red de aire comprimido en el nivel O, parte B.



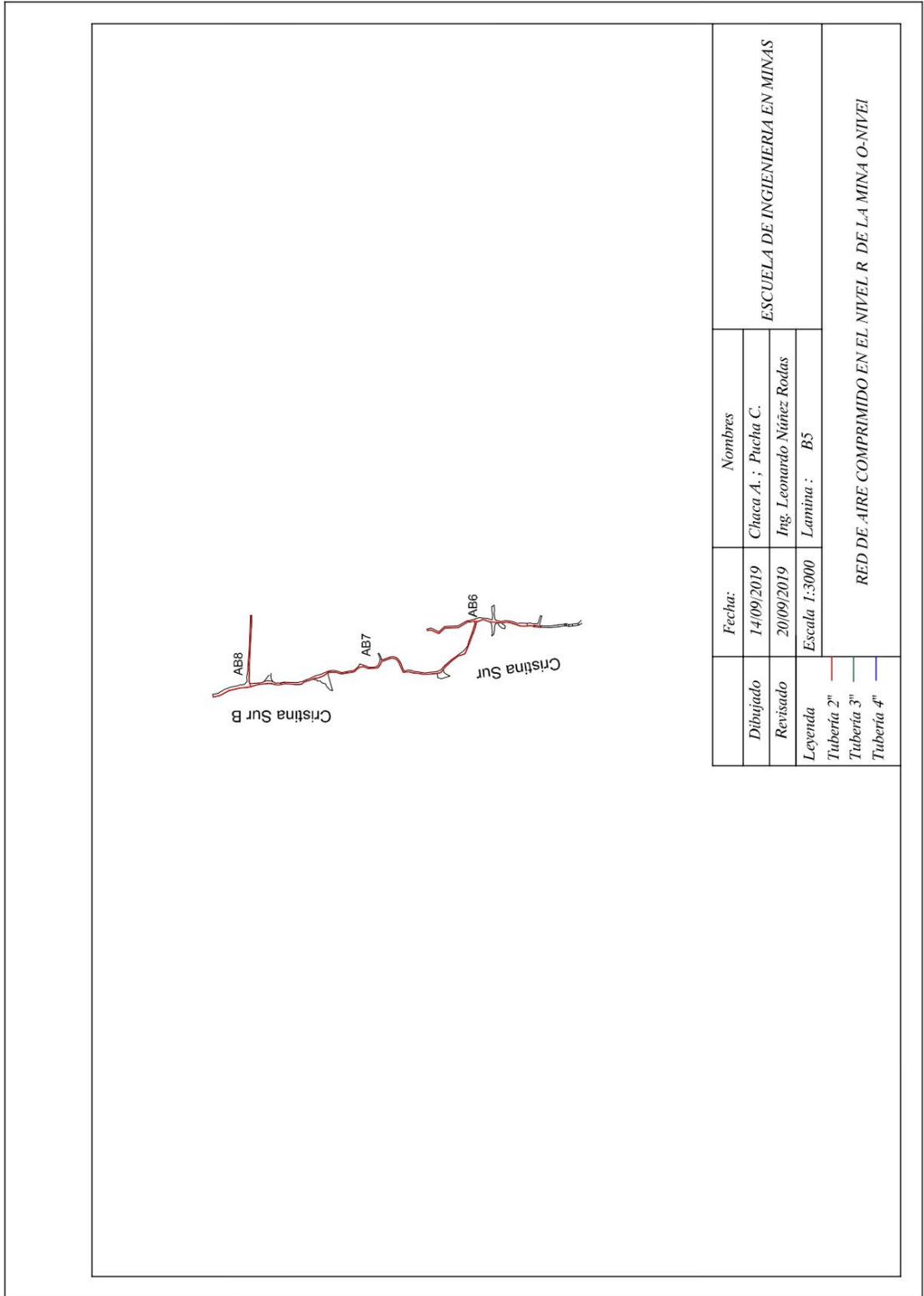
Anexo 7.- Red de aire comprimido en el nivel P.



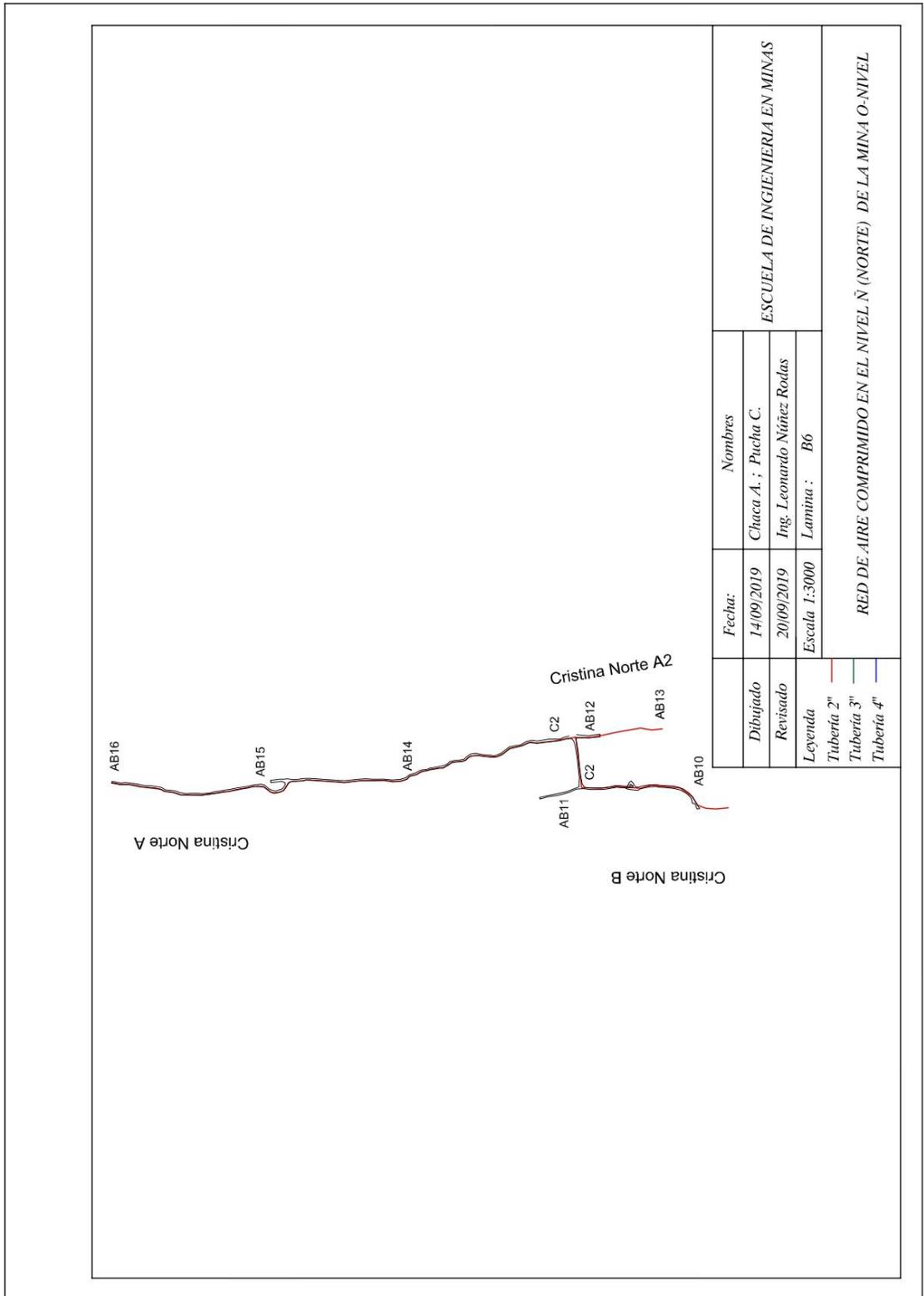
Anexo 8.- Red de aire comprimido en el nivel Q.



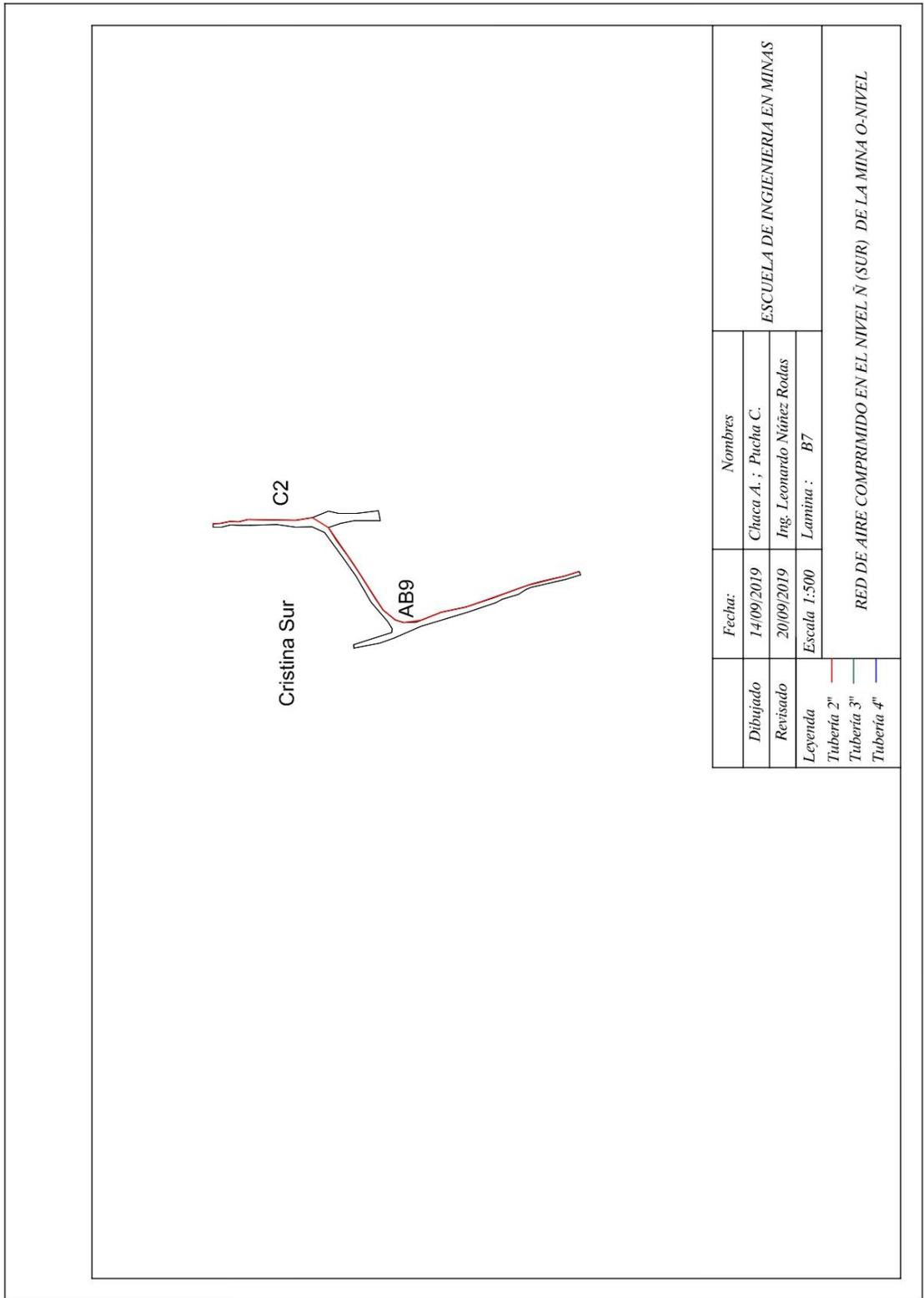
Anexo 9.- Red de aire comprimido en el nivel R.



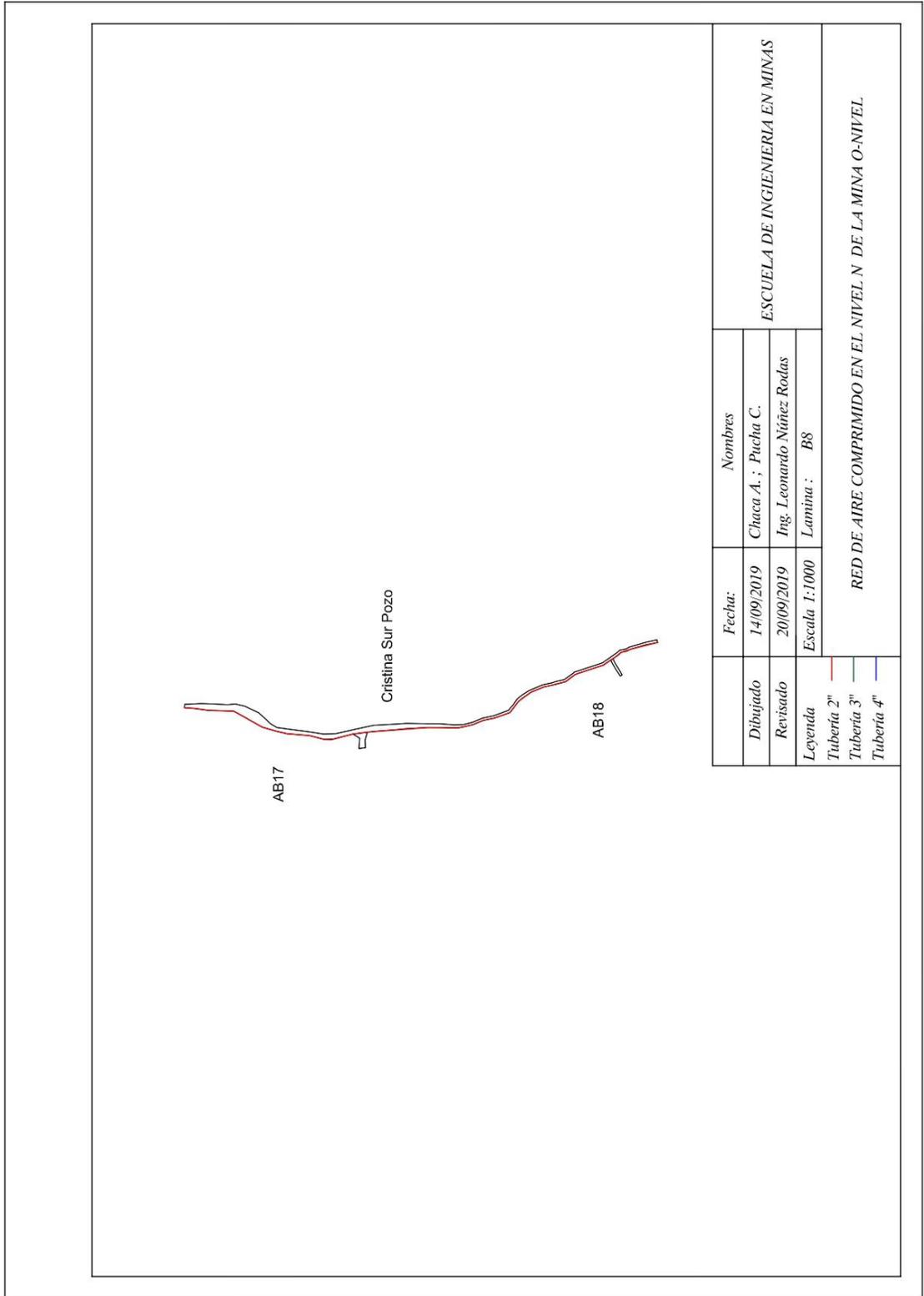
Anexo 10.- Red de aire comprimido en el nivel Ñ (norte).



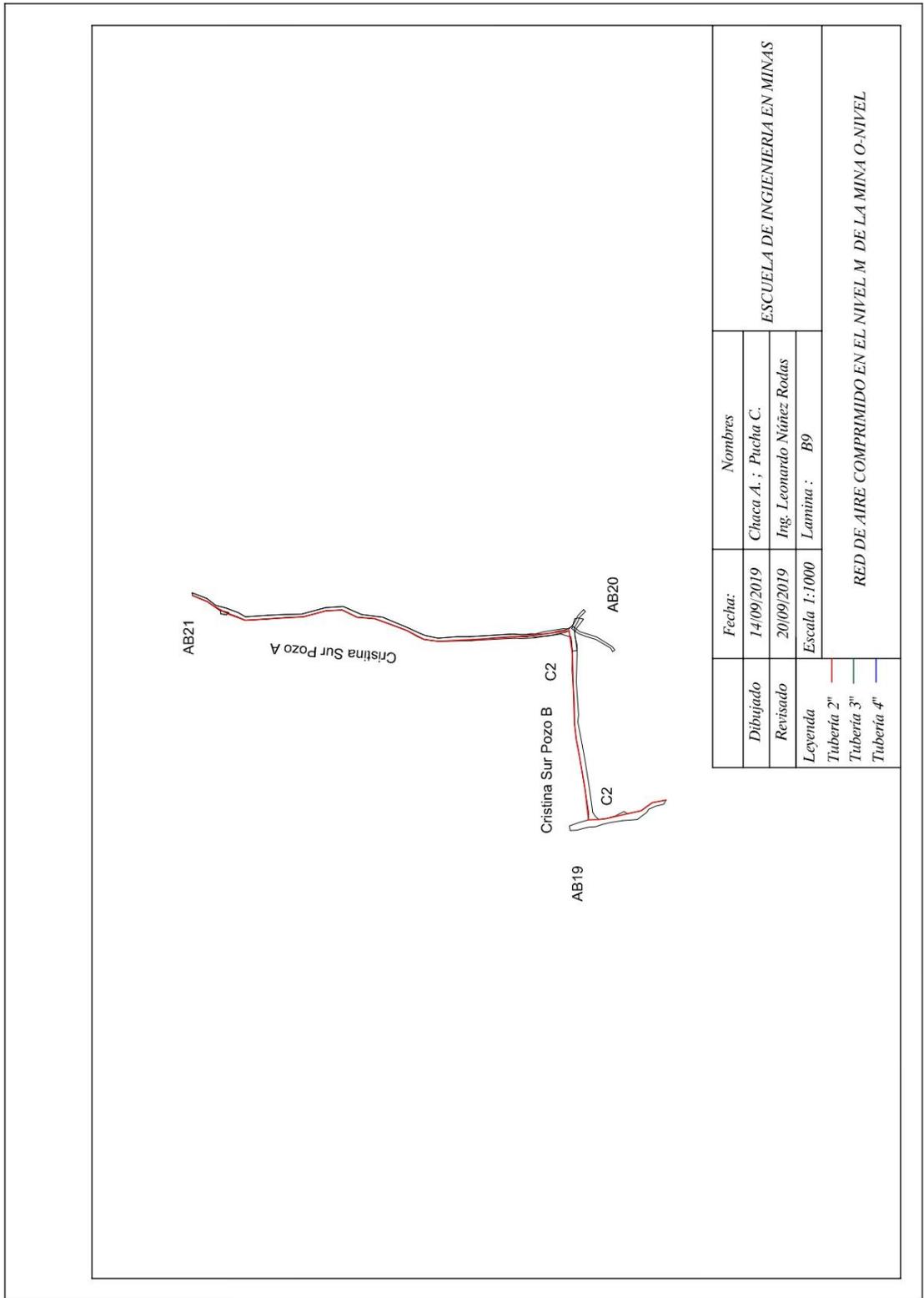
Anexo 11.- Red de aire comprimido en el nivel Ñ (sur).



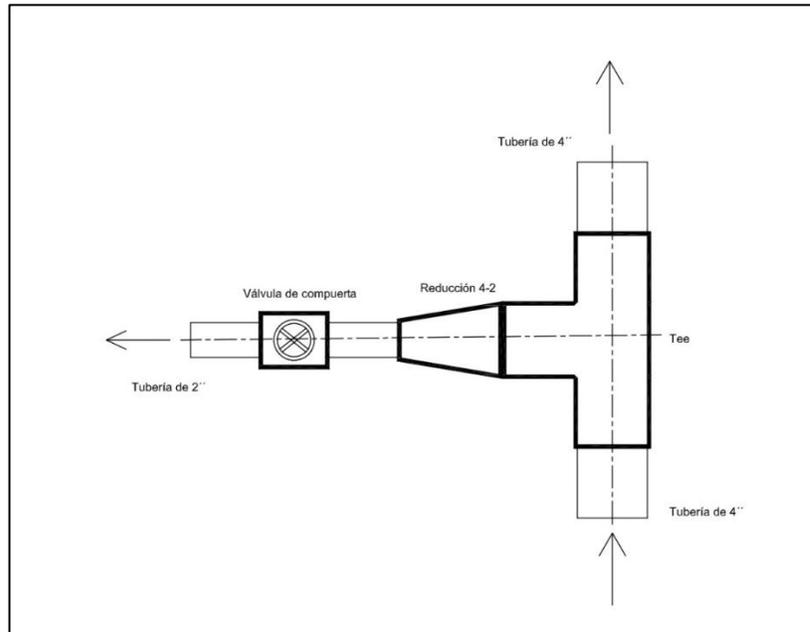
Anexo 12.- Red de aire comprimido en el nivel N.



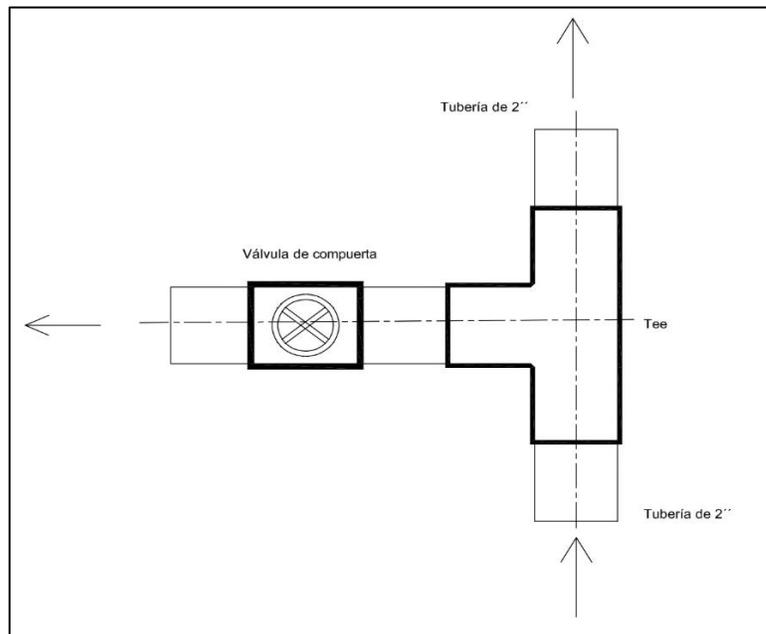
Anexo 13.- Red de aire comprimido en el nivel M.



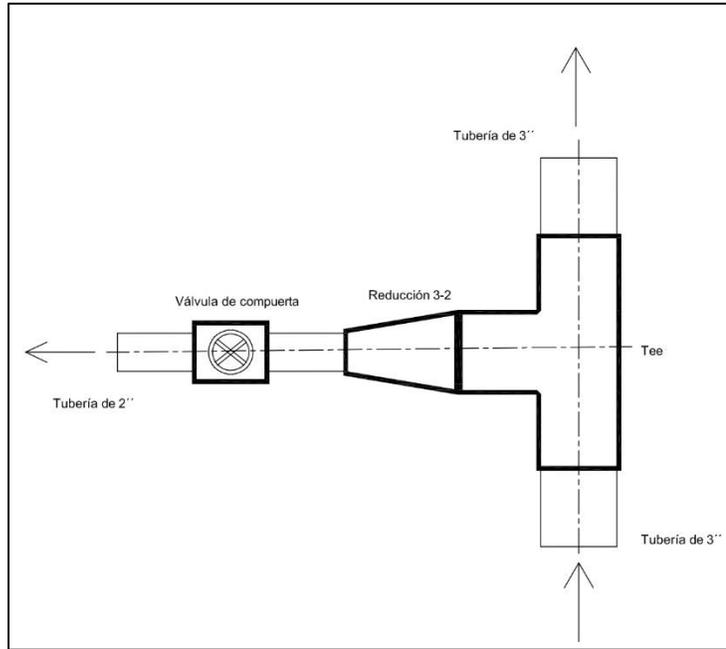
Anexo 14.- Unión de accesorios, Detalle AA.



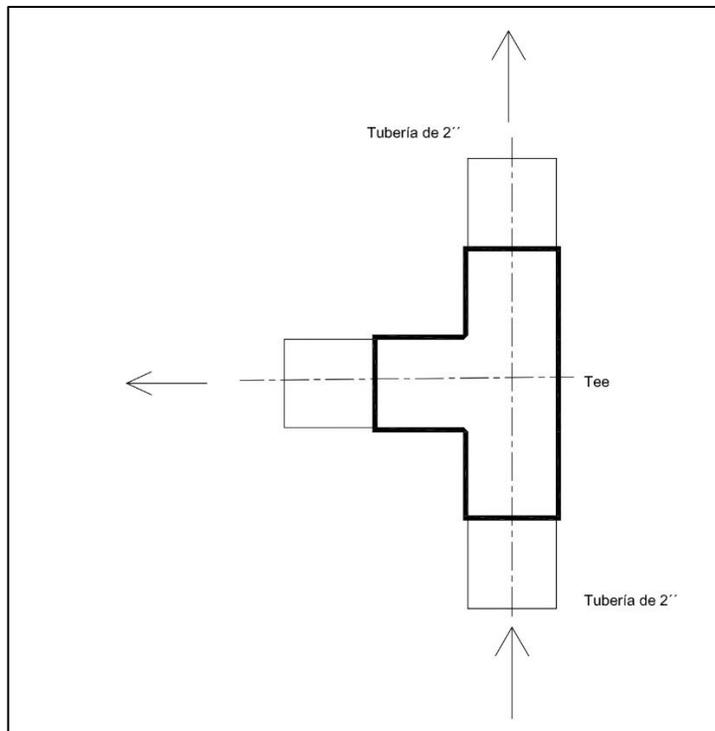
Anexo 15.- Unión de accesorios, Detalle AB



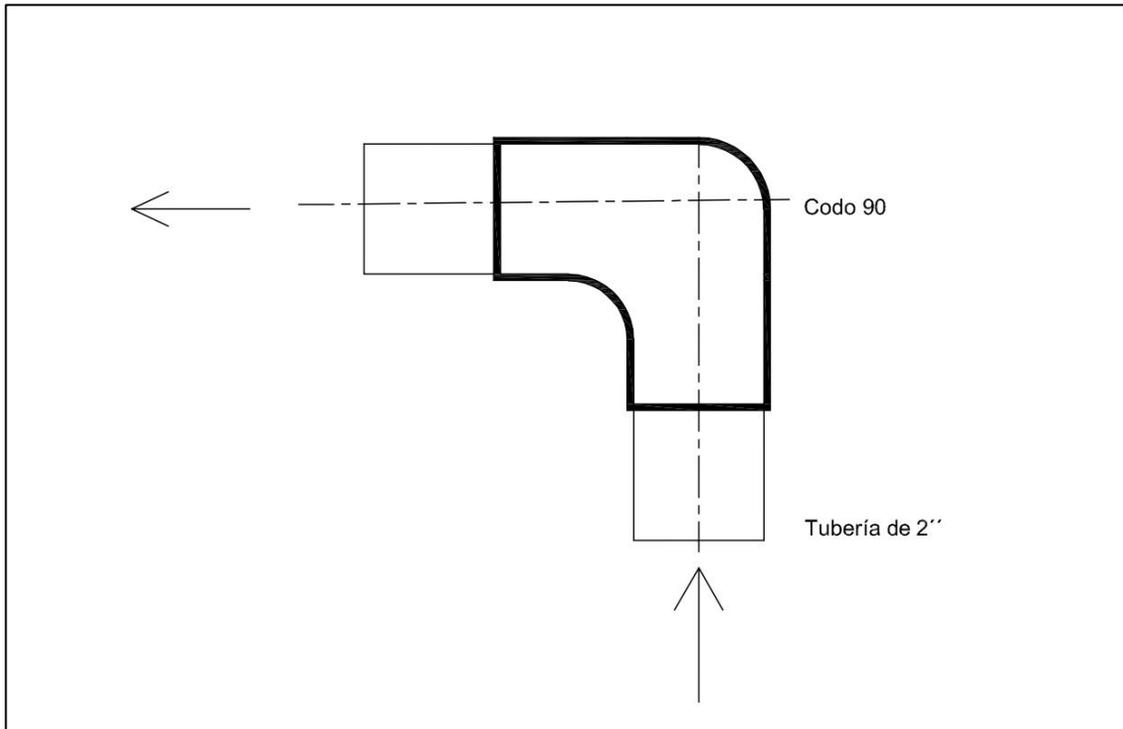
Anexo 16.- Unión de accesorios, Detalle AD



Anexo 17.- Unión de accesorios, Detalle AT2



Anexo 18.- Unión de accesorios, Detalle C2



Anexo 19.- Unión de accesorios, Detalle C3.

