 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-05

DISEÑO ESTACIÓN Y RED DE AIRE COMPRIMIDO TRANVIA AYACUCHO MEDELLÍN

Autor:

JOSE ALEXANDER GARCÉS ARDILA

Ingeniería electromecánica

Director(es) del trabajo de grado

Julio Alberto Casas Monroy

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Medellín

2017

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	2
Tabla de Figuras	6
Lista de Tablas.....	10
RESUMEN.....	11
RECONOCIMIENTOS.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Objetivos	14
1.1.1 General	14
1.1.2 Específicos.....	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. FUNDAMENTOS DE AIRE COMPRIMIDO.....	15
2.1.1 Unidades y Símbolos	16
2.1.2 Definición de Aire Atmosférico	17
2.2. AIRE COMPRIMIDO COMO GAS IDEAL	17
2.2.1 Presión.....	18
2.2.2 Volumen Específico	19
2.2.3 Ley de los Gases Ideales.....	20
2.2.4 Flujo Volumétrico (v_0)	21
2.2.4.1 Flujo laminar	23
2.2.4.2 Flujo turbulento.....	23
2.2.4.3 Número de Reynolds (Re)	23
2.2.5 Pérdida de Presión en un Tubo	24
2.3 HUMEDAD DEL AIRE.....	25
2.3.1 Punto de rocío.....	25
2.3.2 Punto de condensación a presión.....	25
2.3.3 Estándares de calidad del aire comprimido	26
2.4 TIPOS DE COMPRESORES	27

2.4.1	Compresores con Desplazamiento Positivo.....	29
2.4.1.1	Compresor de Pistón	29
2.4.1.2	Pérdidas	30
2.4.1.3	Espacio Muerto.....	30
2.4.1.4	Pérdidas de Entrega Causadas por el Espacio Muerto	31
2.4.2	Compresor de Tornillo Lubricado.....	31
2.4.2.1	Características de los compresores de tornillo	33
2.5	TRATAMIENTO DE AIRE	33
2.5.1	Estándar de Calidad de Aire Comprimido ISO 8573-1.....	33
2.5.2	Humedad y Condensado	34
2.5.2.1	Humedad.....	34
2.5.2.2	Punto de rocío	35
2.5.2.3	Demostración de punto de rocío y humedad	35
2.5.3	Separación mecánica inicial.....	36
2.5.4	Métodos de secado del Aire.....	37
2.5.4.1	Condensación.....	37
2.5.4.2	Secado por refrigeración	38
2.5.4.3	Sorción	38
2.5.4.3.1	Adsorción	38
2.5.4.3.2	Absorción	38
2.5.4.4	Filtración	38
2.5.4.4.1	Filtros de partículas (Filtros de superficie).....	39
2.5.4.4.2	Filtro coalescentes (Filtros de lecho profundo).....	39
2.5.4.4.3	Filtro de carbón activado	39
2.5.5	Drenaje de Condensados	40
2.5.5.1	Drenaje controlado por flotadores.....	41
2.5.5.2	Drenajes con control de nivel electrónico	41
2.5.5.3	Instalado de Drenaje de Condensados.....	42
2.5.5.4	Errores en la instalación	44
2.5.5.5	Tratamiento de Condensados.....	45

2.6	Calidad de Aire según el tipo de Industria	47
2.7	Distribución del aire comprimido	47
2.7.1	Tubería Principal.....	47
2.7.2	Tubería de distribución.....	48
2.7.3	Transporte del aire comprimido	49
2.7.4	Materiales para el transporte del aire comprimido	50
2.7.4.1	Acero al carbono.....	50
2.7.4.2	Acero galvanizado	50
2.7.4.3	Acero inoxidable	51
2.7.4.4	Polímeros	51
2.7.4.4.1	Polipropileno.....	51
2.7.4.5	Aluminio.....	51
2.8	Almacenamiento de aire.....	54
2.8.1	Calculo del tanque de aire como acumulador	55
2.8.2	Calculo del tanque dependiendo de la frecuencia permisible de entrada en carga del compresor	56
3.	METODOLOGIA	57
4.	CÁLCULOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	59
4.1.1	Definición de las Condiciones Ambientales de la Ubicación del Equipo 60	
4.1.2	Determinar el Caudal de Aire Requerido en el Proceso	60
4.1.3	Definir la Presión de Trabajo en la Estación de Aire	63
4.1.3.1	Presión punto final:	64
4.1.3.2	Caída de presión tratamiento de aire:.....	64
4.1.3.3	Caída red cuarto compresores	65
4.1.3.4	Caída de presión de la red principal	67
4.1.3.5	Colector de los 3 pisos	67
4.1.3.6	Caídas de presión en nivel 0	67
4.1.3.7	Caídas de presión en nivel 1	70

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

4.1.3.8	Caídas de presión en nivel 2	70
4.1.3.9	Presión en tanque pulmón (Ptq)	73
4.1.3.10	Delta de presión de control	74
4.2	Diseño y Distribución de la Red de Aire Comprimido	75
4.3	Selección de los Compresores	77
4.4	Selección del secador y el tratamiento del aire	85
4.4.1	Selección del secador	85
4.4.2	Selección filtración	87
4.5	Selección del tanque pulmón	89
5.	RESULTADOS	92
6.	CONCLUSIONES	99
	REFERENCIAS	100

Tabla de Figuras

Figura 1 Concepto de presión y unidades. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	18
Figura 2 Presión de aire dependiendo de altura. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	19
<i>Figura 3 Volumen vs temperatura.</i> Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	20
<i>Figura 4 Volumen vs presión.</i> Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	20
<i>Figura 5 Tasa de flujo según el área.</i> Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	22
<i>Figura 6 Flujo laminar.</i> Fuente: (sabdifisica, 2017).	23
<i>Figura 7 Flujo turbulento.</i> Fuente: (sabdifisica, 2017).	23
<i>Figura 8 Viscosidad en función de la temperatura.</i> Fuente: (Reyes, 2017).	24
<i>Figura 9 Diagrama de moody.</i> Fuente: (Politecjc, 2017).	24
Figura 10 Caída de Presión a lo largo de la tubería. (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	25
Figura 11 Tipos de Compresores. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	28
Figura 12 Funcionamiento Pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	29
Figura 13 Funcionamiento del Compresión de pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	30
Figura 14 Espacio Muerto y tolerancias del Pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	31
Figura 15 Descompresión del Gas en el Espacio Muerto y Composición del Desplazamiento Teórico. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	31
Figura 16 Diagrama de Compresor de Tornillo Lubricado. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	32
Figura 17 Contaminantes en el Aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	33
Figura 18 Máxima humedad en el aire relacionada al punto de rocío. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	35
Figura 19 Vaso de Cerveza a 8 °C y Condensado a su alrededor. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Figura 20 Separador ciclónico de condensados. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	37
Figura 21 Diferentes Métodos para secado del aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	37
Figura 22 Puntos de ubicación drenajes de condensados. Fuente: propia.	40
Figura 23 Drenaje por flotador de nivel. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	41
Figura 24 Drenaje por sensor de nivel Eco-drain. Fuente: (KAESER, s.f.).	42
Figura 25 Partes drenaje por sensor de nivel Eco-drain.Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	42
Figura 26 Montaje real de un drenaje de condensados Eco-drain. Fuente: propia.	43
Figura 27 Ejemplo Montaje drenaje de condensados Eco-drain.Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	43
Figura 28 Drenaje en Común Trabaja como Bypass. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	44
Figura 29 Inclinación Inadecuada dificulta el drenado. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	44
Figura 30 Baja Inclinación Evita Trampas de Agua.Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	45
Figura 31 Condensado Aceitoso. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	46
Figura 32 Funcionamiento Aquamat .Fuente: (KAESER, s.f.).	46
Figura 33 Tratamiento de Aire depnediendo el tipo de industria.Fuente: (KAESER COMPRESORES, s.f.).	47
Figura 34 Distribución en anillo. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	48
Figura 35 Distribución en malla. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	49
Figura 36 Distribución recta. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	49
Figura 37 Efectos de la corrosión causada por el condensado. Fuente: (KAESER).	53
Figura 38 Tubería con de 5 años de operación. Fuente: (KAESER, s.f.).	53
Figura 39 Eficiencia del tipo de flujo. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	54
Figura 40 Cambios bruscos de sección en tubería Polipropileno. Fuente: (KAESER).	54

Figura 41 Presión punto final del proceso. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	64
Figura 42 Caída de presión en tanque, secador y filtro de línea. Fuente: Propia.	65
Figura 43 Caída de presión del tratamiento del aire. Fuente: Propia.	65
Figura 44 Monograma para determinar el posible diámetro de la tubería. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).	67
Figura 45 Cálculo caída de presión cuarto de compresores con software transair. Fuente: (PARKER, 2016).	68
Figura 46 Diámetro de tubería colector. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).	68
Figura 47 Caída de presión colector con software transair. Fuente: (PARKER, 2016).	69
Figura 48 Diámetro de tubería nivel 0. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).	69
Figura 49 Caída de presión nivel 0 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).	70
Figura 50 Diámetro de tubería nivel 1. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).	71
Figura 51 Caída de presión nivel 1 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).	71
Figura 52 Diámetro tubería nivel 2. Fuente: (PARKER, 2016).	72
Figura 53 Caída de presión nivel 2 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).	72
Figura 54 Caída de presión sistema de tratamiento y red de aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	73
Figura 55 Presión final de estación de aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).	74
Figura 56 Diseño de la red de aire comprimido en cada nivel del edificio taller tranvía Ayacucho. Fuente: Propia.	75
Figura 57 Distribución red de aire nivel 1. Fuente: Propia.	75
Figura 58 Distribución red de aire nivel 0. Fuente: Propia.	76
Figura 59 Distribución red de aire nivel 2. Fuente: Propia.	76
Figura 60 Perfil de consumo de la simulación. Fuente: (KAESER COMPRESORES).	84
Figura 61 Costos energéticos de los compresores evaluados. Fuente: (KAESER COMPRESORES).	84
Figura 62 Secador refrigerativo Secotec. Fuente: (KAESER COMPRESORES).	85
Figura 63 Filtro de línea KE para partícula y residuo de aceite. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).	88
Figura 64 Tanque pulmón galvanizado por dentro y por fuera bajo norma europea TUV. Fuente: (KAESER COMPRESORES, 2016).	90
Figura 65 P&I estación de aire. Fuente: Propia.	94
Figura 66 Área recomendada para cuarto de compresores. Fuente: Propia.	95
Figura 67 Conexión neumática cuarto de compresores. Fuente: Propia.	96

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Figura 68 Detalle de conexión Salida de compresores y tratamiento. Fuente: Propia.
..... 97

Figura 69 3D del cuarto de compresores. Fuente: Propia..... 98

Lista de Tablas

Tabla 1 Unidades básicas del SI.	16
Tabla 2 Unidades derivadas del SI.....	16
Tabla 3 Composición química del aire.	17
Tabla 4 Valores de Temperatura y Presión de vapor de Saturación.	26
Tabla 5 Especificaciones el aire según ISO 8573-1:2010.	27
Tabla 6 Estándar ANSI/ISA- 7.0.01-1996 especificaciones del aire para instrumentos.	27
Tabla 7 Norma ISO para los filtros.	40
Tabla 8 Características de los diferentes tipos de materiales.	52
Tabla 9 Diferencias técnicas de los materiales.	52
Tabla 10 Condiciones Ambientales según el lugar de trabajo.....	61
Tabla 11 Consumos de aire nominales del proceso.....	62
Tabla 12 Calculo de caudal de aire requerido total.	63
Tabla 13 Caída de presión de elementos de tratamiento de aire.	64
Tabla 14 Sumatoria caída de presión red.	73
Tabla 15 Delta de presión del sistema hasta el punto final de uso.....	74
Tabla 16 Ficha técnica compresor BSD 50 Kaeser.....	78
Tabla 17 Ficha técnica fabricante 1.....	79
Tabla 18 Ficha técnica fabricante 2.....	80
Tabla 19 Comparativo técnico equipos evaluados.	81
Tabla 20 Calculo manual costo energético equipos evaluados.	82
Tabla 21 . Simulación consumo energía compresor Kaeser BSD 50.....	82
Tabla 22 Simulación consumo energía compresor Fabricante 1 - R37IE.	83
Tabla 23 Simulación consumo energía compresor Fabricante 2 – GA 37.	83
Tabla 24 Factores de corrección por condiciones de operación.	86
Tabla 25 Factores de corrección para el taller tranvía Ayacucho.....	86
Tabla 26 Calculo secador.....	86
Tabla 27 Especificaciones técnicas secadores refrigerativos Secotec.....	87
Tabla 28 Factores de corrección por presión.	88
Tabla 29 Factor de presión para taller tranvía Ayacucho.	89
Tabla 30 Calculo filtro.....	89
Tabla 31 Condiciones de operación del compresor.	89
Tabla 32 Dimensiones y propiedades del tanque.....	91
Tabla 33 Sumatoria de caídas de presión.....	92

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

RESUMEN

Por la construcción del tranvía de Ayacucho, el cual fue diseñado para mejorar la calidad de vida de las personas que habitan la zona oriental de Antioquia, mejorando el transporte, se dio la necesidad de diseñar un taller de mantenimiento para este sistema, el cual debe contar con una red de aire comprimido, utilizada para todas las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

Para el diseño de la red de aire comprimido, se partió de las características del sistema de aire comprimido existente en uno de los talleres del metro de Medellín, el cual posee una red de aire comprimido con los implementos básicos para el mantenimiento de este tipo de coches. Adicional se tendrá en cuenta otros equipos de nueva tecnología que posee el sistema y las posibles ampliaciones según los planos suministrados por el contratista, pero se dejara a nuestra disposición la distribución final del taller y la ubicación de cada punto de trabajo del tranvía Ayacucho.

Las características del sistema se definieron por las condiciones ambientales del lugar donde estarán ubicados los equipos y se consideraron variables del proceso como presión de trabajo de los equipos, caudal total de aire y calidad de aire. Se seleccionó tecnología de punta para cumplir con las necesidades de calidad, eficiencia energética y costo.

Posteriormente a esto se desarrolló toda la fase de ingeniería, donde se realizaron los cálculos de presión y caudal mínimo necesario para el sistema, se seleccionó el tipo de tubería y diámetro comercial disponible, basados en la mayor demanda posible del sistema, por último se realizó la selección de los equipos (compresores, equipos de tratamiento de aire, tipo de red a utilizar cerrada o abierta y material de esta.

Por otro parte, el diseño de la instalación eléctrica se basa en las recomendaciones de protección y cableado de potencia requerido para la conexión de los estos equipos, ya que el sistema de control viene generalmente incorporado a ellos. El sistema eléctrico de potencia requerido para la operación del sistema es suministrado por parte del usuario final bajo las indicaciones dadas por el fabricante de los equipos según normas internacionales.

Por último, se documenta el proyecto con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema de aire comprimido, se realizan las memorias de cálculo y planos correspondientes de tuberías e instrumentación (P&ID) y ubicación de los equipos en el taller.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a Dios, que me dio una familia comprensiva y cariñosa, dándonos la fuerza necesaria en los momentos difíciles.

Agradecemos al METRO DE MEDELLÍN Y KAESER COMPRESORES, quien nos permitió realizar dicha labor y así aportar al desarrollo y crecimiento personal e intelectual, al tratar temas tan importantes para el sector industrial de Medellín, como fue diseñar la red de aire comprimido para la estación del tranvía Ayacucho. Así mismo agradecer a mis compañeros de trabajo los cuales me aportaron experiencia y amabilidad.

Muy satisfechos con el apoyo prestado por nuestro asesor Julio Alberto Casas, quien respaldó y apoyó nuestro proyecto y nos asesoró de la mejor forma posible, durante el tiempo que se desarrolló el trabajo. Así mismo al profesor Juan Gonzalo Ardila quien aportó de su experiencia para lograr estructurar una buena propuesta de trabajo.

1.INTRODUCCIÓN

El aire comprimido es una forma de energía que puede ser almacenada en forma segura y utilizada cuando se desee, esta juega un papel importante en la industria actual, casi el 90% de las empresas fabricantes automatizadas utilizan aire comprimido en sus procesos de producción y el 60 % de los talleres de mantenimiento y reparación, por sus grandes ventajas: materia prima gratis, no contamina, facilita el trabajo, disminuye las horas de mantenimiento o reparación.

Con la necesidad existente en la ciudad de Medellín de mejorar el transporte en la zona oriental y la calidad de vida de sus habitantes, se creó el tranvía de Ayacucho, el cual es un medio de transporte ferroviario, urbano y eléctrico, el cual cuenta con 9 estaciones, 12 coches, 3 puntos de transferencia y una extensión de 4,3 km.

El cual para su mantenimiento requiere de un taller con todas las herramientas mínimas necesarias para la revisión de todos los componentes, que hacen parte de los coches, para esto se diseñará una red de aire comprimido con todos sus componentes (sistemas de tratamiento, almacenamiento y distribución general de la red); con las especificaciones necesarias de calidad de aire y eficiencia energética para el tranvía de Ayacucho, además de sus correspondientes planos y manual de funcionamiento, mantenimiento y reparación.

Las principales labores de mantenimiento a realizar en el taller serán: labores de posicionamiento (pistones, motores neumáticos, válvulas), de proyección como procesos de pinturas, soplado de plásticos, herramientas neumáticas, transporte neumático de materiales granulados o incluso el almacenaje de energía.

En el primer capítulo se habla sobre el tema a tratar, se especifica porque es necesario realizar el diseño de esta red de aire comprimido y bajo que para metros se diseñó y se seleccionaron los equipos. El segundo capítulo trata sobre los conceptos básicos que fundamentaron el trabajo, como formulas y criterios de selección de cada componente.

En la capitulo tres se habla de la metodología utilizada y de las actividades a realiza para lograr el objetivo principal que es el diseño completo de la red de aire comprimido, para el taller de mantenimiento del tranvía de Ayacucho. En el capítulo cuatro se especifican los resultados obtenidos en el diseño, basados en parámetros de los equipos como presión, calidad del aire y caudal total necesario para el correcto funcionamiento del sistema. El ultimo capitulo habla sobre la experiencia y dificultades ocurridas en el transcurso del proyecto y como se les dio solución.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

1.1. Objetivos

1.1.1 General

Diseñar la estación y red de aire comprimido para el taller tranvía Ayacucho, que comprende los sistemas de tratamiento, almacenamiento y distribución general de la red.

1.1.2 Específicos

- Investigar las características técnicas de los equipos a utilizar en el taller del tranvía de Ayacucho, para el diseño y selección de los demás componentes del sistema.
- Definir y calcular los parámetros de los compresores requeridos para la red de distribución de aire.
- Seleccionar y/o calcular cada elemento que hace parte del sistema de aire comprimido (compresor, sistema de tratamiento del aire, tanque de almacenamiento y red de transporte).
- Diseñar la distribución o ubicación de los compresores y la red de aire.
- Elaborar memorias, planos y cálculos del diseño, además de los correspondientes manuales de mantenimiento y reparación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTOS DE AIRE COMPRIMIDO

El aire comprimido es una herramienta esencial para la industria automatizada, este permite el transporte de energía a través de largas distancias, para ser convertido en trabajo en su destino o punto final. Una de las fuentes más conocidas de aire comprimido son los compresores portátiles, cuya principal utilización es en la construcción de calles, en minas y en talleres. En estas aplicaciones los compresores portátiles proveen la fuerza o potencia para las herramientas neumáticas.

Por lo general los compresores están ubicados en una sala aparte de la red, con todos sus elementos para el tratamiento del aire, este aire es comprimido, secado, filtrado, y almacenado en un tanque de presión. De este tanque se alimenta la red, estos compresores pueden estar trabajando en serie cuando se necesita mayor presión o en paralelo cuando se necesita grandes caudales de acuerdo a las necesidades del sistema.

Hoy por hoy el aire comprimido está presente en casi todos los tipos de industria existentes, dentro de los cuales tenemos:

- Industria química
- Productores de Energía
- Hospitales
- Fábricas de Madera
- Fundiciones
- Moldaje de Plástico
- Agricultura e Industria Forestal
- Fabricación y procesamiento de alimentos
- Fabricación y procesamiento de Papel
- Textiles
- Ingeniería Ambiental
- Fabricación de Automóviles
- Industria Metalúrgica

Dentro de cada una de estas industrias existen aplicaciones donde es vital tener el aire comprimido, debido a que los procesos son cada vez más automatizados y requieren velocidad en sus líneas de producción.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.1.1 Unidades y Símbolos

Dependiendo de las diferentes culturas, las unidades usadas varían. Las unidades de volumen, por ejemplo, usadas en Europa son litros o metros cúbicos, mientras que en los EEUU se usan pulgadas cúbicas, pies cúbicos y yardas cúbicas.

Las unidades y símbolos usados en el proyecto de grado siguen el sistema internacional (SI), que define siete unidades de base y unidades derivadas de estos. Antes de hablar de la generación del aire comprimido y sus aplicaciones en los siguientes capítulos, es necesario definir algunas de estas unidades para evitar ambigüedades de lenguaje.

Tabla 1 Unidades básicas del SI.

Unidad Base	Abreviación	Símbolo	Nombre
Distancia	l	[m]	metro
Masa	m	[kg]	Kilogramo
Tiempo	t	[s]	segundo
Electricidad	I	[A]	Ampere
Temperatura	T	[K]	Kelvin
Intensidad de luz	L	[cd]	candela
Cantidad de sustancia	n	[mol]	mole numero

Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Tabla 2 Unidades derivadas del SI.

Derivativo	Abreviación	Símbolo	Nombre
Fuerza	F	[N]	Newton
Presión	p	[Pa, bar]	Pascal, bar; (1 bar = 100.000 Pa)
Temperatura	T	[°C]	Celsius
Trabajo	W	[J]	Joule
Potencia	P	[W]	Watt
Tensión Eléctrica	U	[V]	Volt
Resistencia Eléctrica	R	[Ω]	Ohm
Frecuencia Eléctrica	f	[Hz]	Hertz

Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.1.2 Definición de Aire Atmosférico

El Aire comprimido no es más que aire atmosférico comprimido y es energía almacenada que se puede convertir en trabajo. Una forma simple de producir aire comprimido es con un Bombín en que el movimiento de un pistón en un cilindro comprime aire y produce calor. Este aire comprimido se puede usar para llenar la llanta de una bicicleta mientras que el calor va al medio ambiente. Todos los contaminantes que estaban en el aire antes de la compresión se mantienen en el aire comprimido en la misma cantidad pero más concentrados.

El aire que conocemos está compuesto en un 78 % por nitrógeno, 21 % de oxígeno y un 1% de helio, argón y otros gases. La composición exacta del aire se muestra a continuación:

Tabla 3 Composición química del aire.

Componente Aproximada	Concentración
1. Nitrógeno	(N) 78.03% en volumen
2. Oxígeno	(O) 20.99% en volumen
3. Dióxido de carbono	(CO2) 0.03% en volumen
4. Argón	(Ar) 0.94% en volumen
5. Neón	(Ne) 0.00123% en volumen
6. Helio	(He) 0.0004% en volumen
7. Criptón	(Kr) 0.00005% en volumen
8. Xenón	(Xe) 0.000006% en volumen
9. Hidrogeno	(H) 0.01% en volumen
10. Metano	(CH4) 0.0002% en volumen
11. Óxido nitroso	(N2O) 0.00005% en volumen
12. Vapor de agua	(H2O) variable
13. Ozono	(O3) variable
14. Partículas	variable

Fuente: (bibdigital, s.f.).

2.2. AIRE COMPRIMIDO COMO GAS IDEAL

Teniendo en cuenta que el aire comprimido es considerado como un gas ideal, es importante analizarlo como tal y considerar variables como la presión, volumen y temperatura (Cengel, 2007).

$$P * v = R * T$$

Donde:

P= presión absoluta (Kpa)

v= volumen especifico (m³/Kg)

T= temperatura absoluta (K)

R= constante del gas ideal (Kj/Kg*k)

2.2.1 Presión

La presión es la fuerza ejercida por un fluido sobre un área determinada, existen tres tipos de presiones: presión atmosférica, presión manométrica y presión absoluta; sus unidades en el sistema Internacional son los pascales (Pa) o N/m².

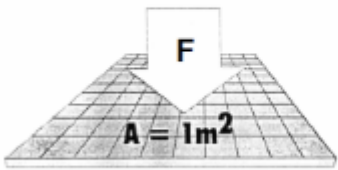
Presión = $\frac{\text{fuerza}}{\text{area}}$	$p = \frac{F}{A}$
Dimensiones:	
1 Pascal = $\frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ metro cuadrado}}$	1 Pa = $\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$
	Relación de Unidades: 10 ⁵ Pa = 1 bar 1 MPa = 10 bar 1 bar = 14.5 psi 1 bar (g) = 14.5 psi (g) 1 bar = 10197 mm agua 1 bar = 750.062 Torr (mm mercurio)

Figura 1 Concepto de presión y unidades. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Presión atmosférica (P atm) se crea por el peso de los metros columna de aire que hay por encima de un punto sobre la tierra, esta varía según su densidad y distancia del centro de la tierra. La presión atmosférica normal a nivel del mar es de 101,3 Kpa, equivalente a 760 mm de mercurio (Torr). La presión atmosférica baja a medida que se aumente la altura.

$$P \text{ atm} = \gamma * h$$

Donde:

γ = peso específico de la sustancia (N/m³)

h= altura sobre el nivel del mar (m)

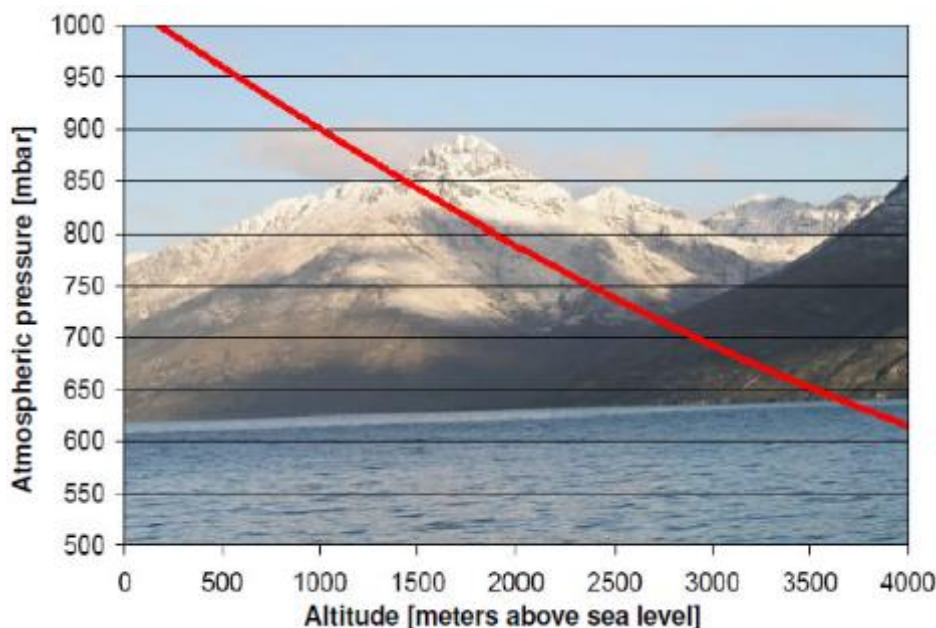


Figura 2 Presión de aire dependiendo de altura. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Presión manométrica (P_{gage}) es la indicada en un manómetro de presión y representa la presión a la que se encuentra un fluido confinado, también representa la diferencia entre la presión medida y la presión atmosférica.

$$P_{gage} = P_{abs} - P_{atm}$$

Presión absoluta (P_{abs}) es la suma de la presión manométrica más la atmosférica, esta medida desde el cero absoluto según la escala de temperatura.

$$P_{abs} = P_{gage} + P_{atm}$$

2.2.2 Volumen Específico

Es el espacio ocupado por una sustancia con determinada masa, además es una variable de estado y generalmente depende de la presión y la temperatura.

$$V = \frac{1}{\rho} = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

ρ = densidad (Kg/m^3)

m = masa (Kg)

La dependencia del volumen de la temperatura y la presión varía dependiendo de la sustancia. El volumen de sólidos y líquidos no varía mucho con relación a la presión, pero cambia

considerablemente dependiendo de la temperatura. Por otro lado el volumen cambia considerablemente con la presión en los gases (Cengel, 2007).

La relación entre volumen, presión y temperatura es un hecho simple y puede ser ilustrado por el siguiente ejemplo:

Un pistón de masa definida encierra un volumen de gas en un cilindro. Cuando se calienta el gas en el cilindro, el volumen del gas se incrementa, empujando el pistón hacia arriba.

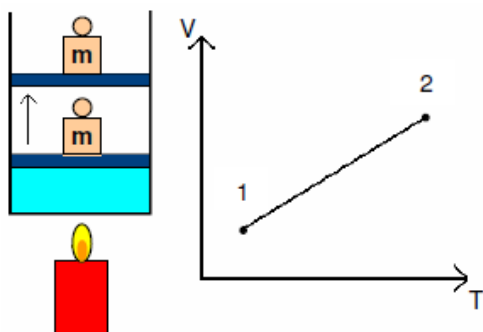


Figura 3 Volumen vs temperatura. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012)

El cambio en el volumen también puede ocurrir cuando la temperatura se mantiene constante y la presión varía. En este caso, la temperatura del gas queda constante, pero al aumentar la masa la presión aumenta y comprime el gas, disminuyendo su volumen inicial.

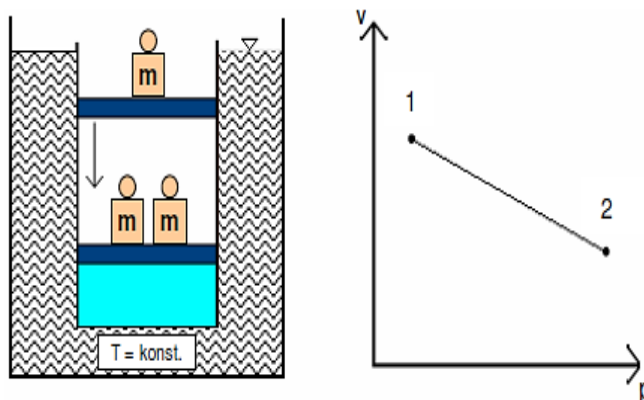


Figura 4 Volumen vs presión. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012)

2.2.3 Ley de los Gases Ideales

La ley del gas de Boyle-Marriotte define la relación entre presión y volumen cuando la temperatura queda constante.

$$P1 * V1 * T2 = P2 * V2 * T1$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Como la temperatura es constante $T_1=T_2$, entonces:

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2$$

La ley de Gay-Lussac define la relación entre temperatura y volumen a una presión constante.

$$P_1 * V_1 * T_2 = P_2 * V_2 * T_1$$

Como la temperatura es constante $P_1=P_2$, entonces:

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

Estas dos leyes conforman la ley de gases ideales

$$P * v = R * T$$

R es la cantidad de trabajo mecánico producido por 1 kg de gas cada vez que aumento en un grado (K) la temperatura, mientras que la presión queda constante. R depende del tipo de gas.

$$R_{aire} = 0,287 \frac{KJ}{Kg} * k$$

- Si el volumen se mantiene constante y se incrementa la presión, por consecuencia se incrementa la temperatura.
- Si la presión se mantiene constante y se incrementa la temperatura, por consecuencia el volumen se incrementa.
- Si el volumen se mantiene constante y se incrementa la temperatura, por consecuencia la presión se incrementa, un ejemplo las llantas de autos.

2.2.4 Flujo Volumétrico (v0)

Es el volumen de fluido que pasa por un área en determinado tiempo, sus unidades pueden ser [l/min], [l/s], [m³/min] o [m³/h]. Para calcular la tasa de flujo volumétrico necesitamos, conocer todas las salidas de la red del sistema y algo más por alguna ampliación futura que pueda sufrir el sistema. El flujo volumétrico a la entrada y salida son iguales cuando el fluido es incompresible.

$$V^0 = \frac{m^0}{\rho} = V * A$$

Donde:

m^0 = flujo másico (kg/s)

V = velocidad del fluido (m/s)

A = área transversal del fluido (m²)

V_e = velocidad a la entrada

A_e = área de entrada

A_s = área de salida

$$V^0 \text{ entrada} = V^0 \text{ salida}$$

$$V_e * A_e = V_s * A_s$$

A continuación se puede ver una ilustración del comportamiento del fluido cuando existe un cambio de sección:

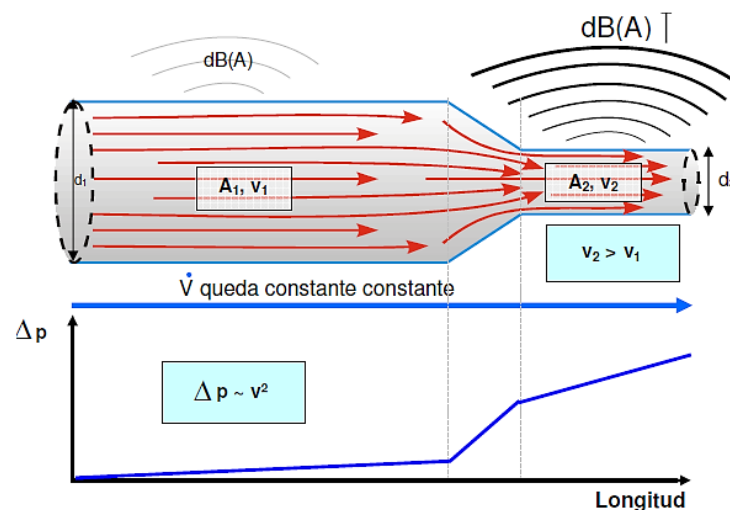


Figura 5 Tasa de flujo según el área. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

La velocidad de flujo es inversamente proporcional al área particular seccionada:

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{A_s}{A_e}$$

2.2.4.1 Flujo laminar

En un flujo laminar, las partículas se mueven en paralelo y la velocidad disminuyen del centro hacia las paredes del tubo, este flujo laminar solamente ocurre cuando la velocidad del fluido es baja.



Figura 6 Flujo laminar. Fuente: (sabdifisica, 2017).

2.2.4.2 Flujo turbulento

El flujo turbulento, es el más común, las partículas no mueven en paralelo y la estructura de la velocidad no es regular. Ocurren reflujos y remolinos y hay gran pérdida de presión y transferencia de calor.

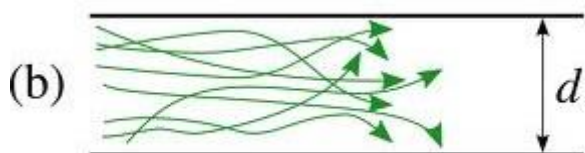


Figura 7 Flujo turbulento. Fuente: (sabdifisica, 2017).

2.2.4.3 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds ayuda a determinar si el flujo es laminar o turbulento. El número (Re) es influenciado por tres factores:

$$Re = \frac{w \cdot d_i}{\nu}$$

w = Promedio de velocidad de flujo (m/s)

d_i = Diámetro del tubo (m)

ν = Viscosidad dinámica (m²/s)

Ejemplo. El aire a una presión de 103,1 Kpa y 20 °C su viscosidad dinámica será, ν= 15.10 x 10-6 m²/s, este valor puede ser calculado, por tablas o por una gráfica como la siguiente:

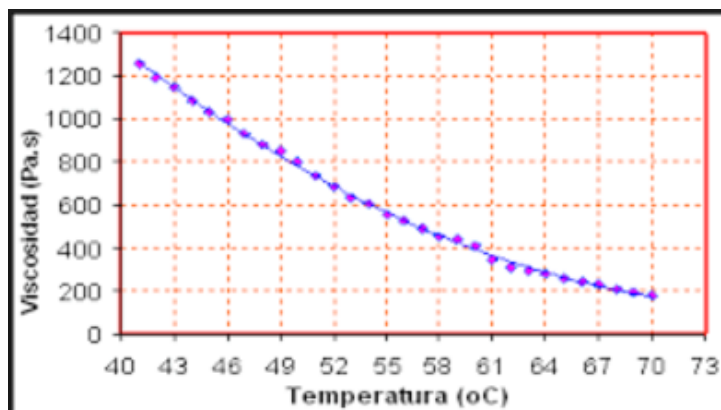


Figura 8 Viscosidad en función de la temperatura. Fuente: (Reyes, 2017).

Después de haber calculado el número de Reynolds y conociendo otros parámetros del sistema como su diámetro y rugosidad de la tubería; además de la velocidad del fluido se puede calcular el factor de fricción de esta:

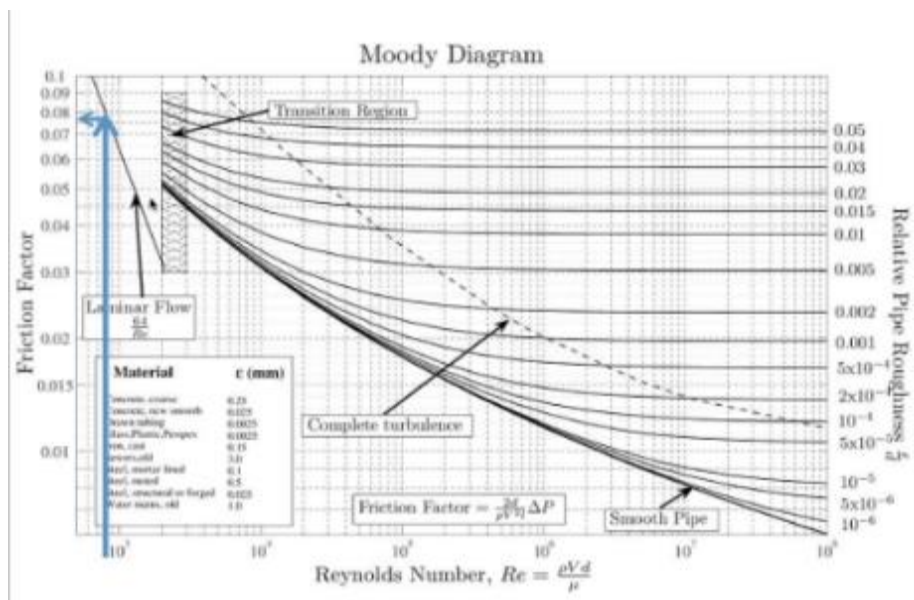


Figura 9 Diagrama de moody. Fuente: (Politecjc, 2017).

2.2.5 Pérdida de Presión en un Tubo

Cada tubo presenta cierta resistencia al flujo de aire que fluye adentro. La resistencia es mucho más grande en flujos turbulentos que en flujos laminares y depende de cuatro factores:

- Área seccional del tubo
- Velocidad del flujo
- Largo del tubo

- Calidad de la superficie de la pared del tubo

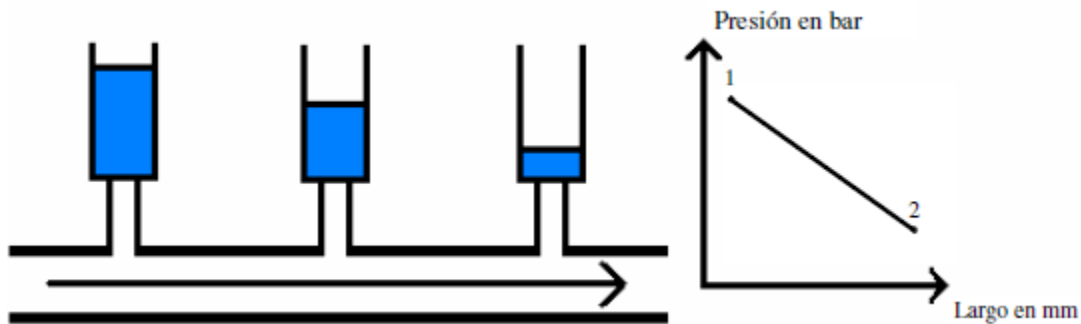


Figura 10 Caída de Presión a lo largo de la tubería. (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.3 HUMEDAD DEL AIRE

El aire en estado natural se encuentra compuesto por vapor de agua, que al condensarse genera gotas de agua.

2.3.1 Punto de rocío

La temperatura de punto de rocío, es la medida de cuánto vapor de agua existe en un gas. El agua tiene la capacidad de existir como un líquido, un sólido o un gas bajo una amplia gama de condiciones.

Para comprender el comportamiento del vapor de agua, en primer lugar resulta útil repasar el comportamiento general de los gases. En cualquier mezcla de gases, la presión total del gas es la suma de las presiones parciales de los gases que lo componen. Esta es la ley de Dalton y se representa de la siguiente manera (mundocompresor, 2017):

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3$$

La temperatura y la presión determinan el grado de vapor de agua que contiene el gas, a mayor temperatura mayor cantidad de vapor de agua, pero menor presión es menor la cantidad de vapor de agua en el aire.

2.3.2 Punto de condensación a presión

El término punto de rocío, se utiliza para definir la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en el aire empezaría a condensarse, con una presión mayor que la atmosférica. Esto es muy importante porque, al cambiar la presión de un gas, se modifica la temperatura del punto de rocío, ósea que la temperatura del punto de rocío es directamente proporcional a la presión.

Por ejemplo en un lugar donde el aire se encuentre a 101,3 Kpa (1013,3 mbar) y una temperatura de punto de rocío de -10 °C (14 °F), Según la tabla anterior, la presión de vapor de saturación del agua será de 2,8 mbar. Si este aire se comprime y la presión total se duplica a 2026,6 mbar entonces, según la ley de Dalton, la presión parcial del vapor de agua, también se duplica a un valor de 5,6

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

mbar. La temperatura del punto de rocío correspondiente a 5,6 mbar es aproximadamente -1 °C (30 °F), con lo cual resulta evidente que al incrementar la presión del aire también se incrementó la temperatura del punto de rocío del aire.

Tabla 4 Valores de Temperatura y Presión de vapor de Saturación.

Temperatura °C (°F)	Presión de vapor de saturación (mbar)
20 (68)	23,5
0 (32)	6,1
-10 (14)	2,8
-20 (-4)	1,3
-40 (-40)	0,2

Fuente: (Vaisala, 2013).

Por el contrario, al expandir un gas comprimido a presión atmosférica se reducen las presiones parciales de todos los gases que lo componen, incluido el vapor de agua y por lo tanto, disminuye la temperatura del punto de rocío del gas. La relación entre la presión total y la presión parcial del vapor de agua, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{P1}{P2} = \frac{e1}{e2}$$

La importancia de la temperatura del punto de rocío en el aire comprimido depende del uso que se le dé al aire y es un indicador de que tan puro es el aire. En muchos casos, el punto de rocío no es crítico o importante (compresores portátiles para herramientas neumáticas, sistemas de inflado de llantas en estaciones de servicio, etc.). Pero en otros casos si es importante el punto de rocío, porque los conductos que transportan el aire, pueden estar expuestos a temperaturas bajo cero y un punto de rocío alto puede derivar en el congelamiento y el bloqueo de los conductos.

En muchas fábricas modernas se utiliza el aire comprimido para operar una serie de equipos, algunos de estos pueden experimentar un mal funcionamiento por la creación de condensados de agua en sus piezas internas. Por ejemplo en ciertos procesos sensibles al agua, como la pulverización de pintura, donde se requiere que el aire comprimido cumpla con ciertas especificaciones puntuales de secado. Por último, en los procesos médicos y farmacéuticos, el vapor de agua y otros gases pueden considerarse contaminantes ya que se requiere un alto nivel de pureza. (Vaisala, 2013).

2.3.3 Estándares de calidad del aire comprimido

La ISO 8573-1:2010 es un estándar internacional, donde se establece las condiciones o especificaciones que debe tener el aire en función del proceso para el cual va a ser utilizado. La norma consta de nueve partes: la parte 1 especifica los requisitos de calidad del aire comprimido, y

las partes 2 a 9 especifican los métodos de prueba para una amplia gama de contaminantes (Paker, 2015). A continuación se definen los límites para las tres categorías de calidad de aire:

- Tamaño máximo de partículas para toda partícula restante
- Temperatura máxima permitida de punto de rocío
- Cantidad máxima de contenido de aceite restante

A cada categoría se le asigna un número de clase de calidad entre 1 y 6, según los valores de referencia que se mencionan en la tabla a continuación. A modo de ejemplo, un sistema que cumple con el estándar ISO 8573-1, se ubica dentro de la clase 1.1.1 generará aire con un punto de rocío que no supere los -70 °C (-94 °F), las partículas restantes en el aire tendrán un tamaño igual o inferior a 0,1 µm y el contenido máximo de aceite será de 0,01mg/m³. Existen otros estándares para la calidad del aire comprimido, como el estándar ANSI/ISA- 7.0.01-1996 que habla sobre las condiciones del aire para instrumentos.

Tabla 5 Especificaciones el aire según ISO 8573-1:2010.

ISO8573-1:2010 CLASE	Partículas sólidas			Concentración másica mg/m ³	Agua		Aceite
	Número máximo de partículas por m ³				Punto de rocío a presión de vapor	Líquida g/m ³	Concentración total de aceite (líquido, aerosol y vapor) mg/m ³
	0,1 - 0,5 micras	0,5 - 1 micras	1 - 5 micras				
0	Tal como especifique el usuario o el proveedor del equipo y más estrictos que los de la Clase 1.						
1	< 20 000	< 400	< 10	-	< -70 °C	-	0,01
2	≤ 400 000	≤ 6000	≤ 100	-	≤ -40 °C	-	0,1
3	-	≤ 80 000	< 1000	-	< -20 °C	-	1
4	-	-	≤ 10 000	-	≤ +3 °C	-	5
5	-	-	≤ 100 000	-	≤ +7 °C	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ +10 °C	-	-
7	-	-	-	5 - 10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5 - 5	-
9	-	-	-	-	-	5 - 10	-
X	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

Fuente: (Paker, 2015).

Tabla 6 Estándar ANSI/ISA- 7.0.01-1996 especificaciones del aire para instrumentos.

Calidad Clase	Partícula Tamaño (µm)	Punto de rocío °C	Punto de rocío °F	Contenido de aceite (mg/m ³)
1	0,1	-70	-94	0,01
2	1	-40	-40	0,1
3	5	-20	-4	1
4	15	3	37	5
5	40	7	45	25
6	-	10	50	-

Tabla 6.. Fuente: (Vaisala, 2013).

2.4 TIPOS DE COMPRESORES

Cuando se habla de aire comprimido, se debe tener en cuenta 2 principios de compresión, uno dinámico y otro de desplazamiento positivo o reciprocantes. En el dinámico la compresión se realiza

por paletas rotativas o impulsores que agregan velocidad o impulso al fluido, muy utilizados en aplicaciones donde se requiere mucho volumen de aire o caudal y baja presión. Los de desplazamiento positivo el incremento de la presión se logra por la disminución del volumen del gas, son utilizados en aplicaciones donde se necesita mucha presión y poco caudal (sedicom-Ltda, 2017).

En este proyecto solo se profundizara y hablara de las características más importantes de los de desplazamiento positivo y más específicamente de los de tornillo lubricado, por ser los más utilizados en la industria para procesos.

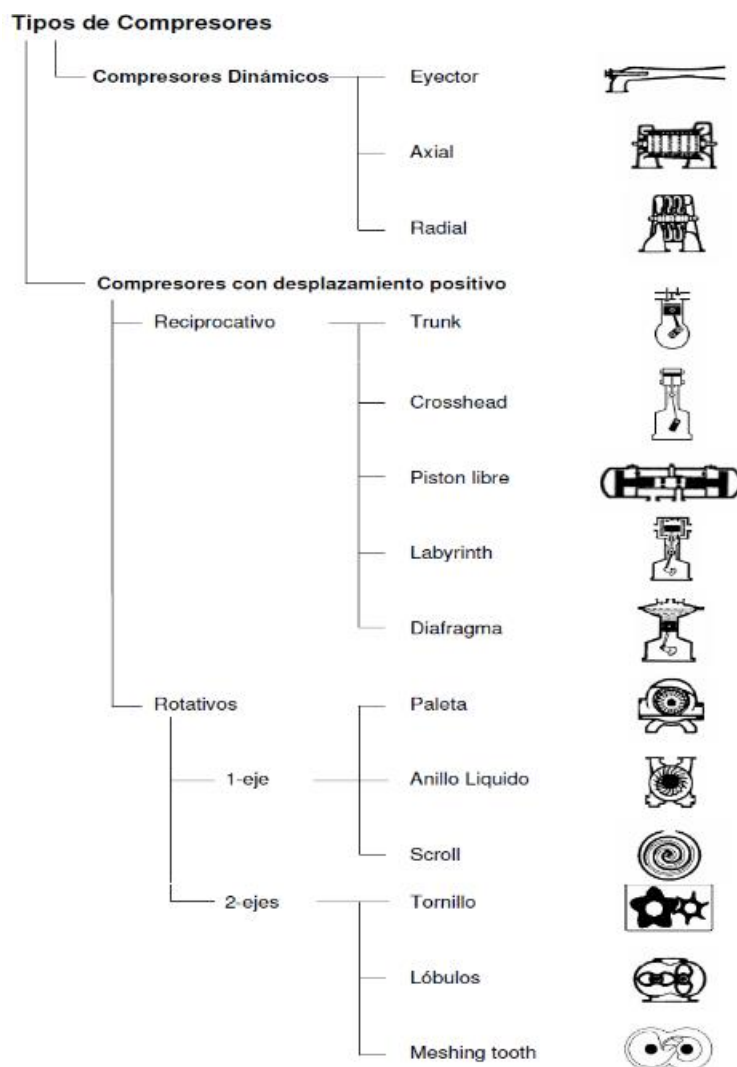


Figura 11 Tipos de Compresores. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.4.1 Compresores con Desplazamiento Positivo

En todos los compresores de desplazamiento positivo, el proceso de almacenamiento funciona de la siguiente forma: el volumen de aire entrante es reducido al máximo, para después ser almacenado y nuevamente comprimido, cuando la presión del tanque de almacenamiento de aire o de la red excede la presión de la cámara de compresión del pistón, se abre una válvula de alivio del sistema, para disminuir la presión del tanque o de la red y evitar que este explote o se reviente. En otros compresores como los de tornillos rotativos, el aire comprimido por los tornillos ínter dentados es expulsado continuamente y a una presión constante sin la necesidad de una válvula de venteo. (Mundo Compresor, 2016).

A continuación se describe detalladamente los tipos de compresores más utilizados para esta aplicación, para su selección se tendrá en cuenta otros parámetros como consumo de energía, costo de mantenimiento. De los sistemas más utilizados tenemos:

- Compresores de pistón
- Compresor rotatorio de 2 ejes (De tornillo lubricado)

2.4.1.1 Compresor de Pistón

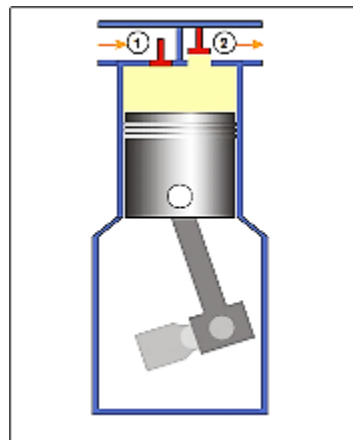


Figura 12 Funcionamiento Pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Los compresores de Pistón, son máquinas de desplazamiento positivo, este tipo de compresores, el aire es aspirado al interior de un cilindro a través de la válvula de admisión (1), por la acción de un pistón accionado por una biela y un cigüeñal. Ese mismo pistón, al realizar el movimiento contrario, comprime el aire en el interior del mencionado cilindro hasta que la presión dentro del cilindro excede la presión de afuera de la válvula de descarga (2) y la abre por el diferencial de presión., liberándolo a la red o a la siguiente etapa, una vez alcanzada la presión requerida (Mundo Compresor, 2016).

El movimiento recíproco es cíclico, entregando aire comprimido en pulsos. La torsión sobre el cigüeñal también es cíclica, subiendo y bajando de acuerdo a la posición del pistón.

El volumen aspirado del pistón es el producto de su área frontal y su carrera. El volumen aspirado es menor que el volumen del cilindro; la diferencia se conoce como espacio muerto.

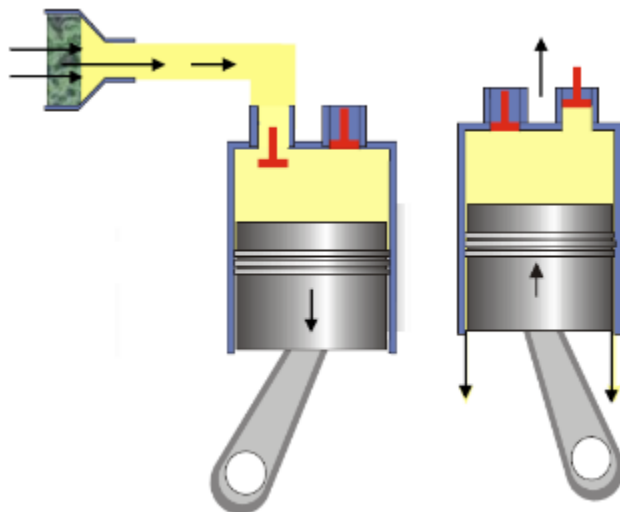


Figura 13 Funcionamiento del Compresión de pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.4.1.2 Pérdidas

- Volumen de entrada se pierde por válvulas o filtros tapados.
- Pérdidas en la salida se producen por gas escapando por adelante del pistón.

2.4.1.3 Espacio Muerto

El “espacio muerto” representa una potencial pérdida de aire entregado y por tal motivo debe ser lo más chico posible. El tamaño del “espacio muerto” o “perdida” depende de varios factores:

- Tolerancias de la fabricación
- Espacio necesario para el funcionamiento de las válvulas.
- Espacio necesario para acomodar la expansión longitudinal termal del pistón y de la manivela.

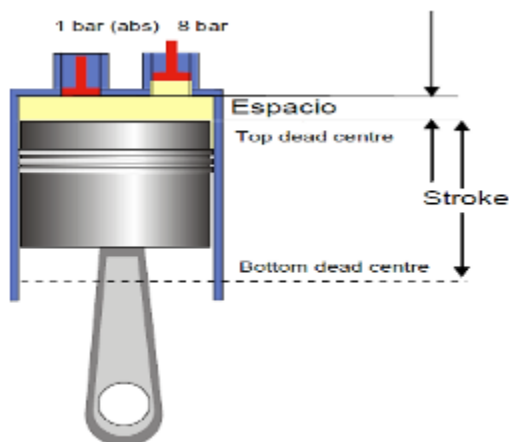


Figura 14 Espacio Muerto y tolerancias del Pistón. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.4.1.4 Pérdidas de Entrega Causadas por el Espacio Muerto

El aire comprimido en el “espacio muerto” no sale de la cámara y se descomprime cuando el pistón está en movimiento hacia abajo, hasta que su presión es menor que la presión fuera de la válvula de entrada. Eso es cuando se cree un vacío y la válvula de entrada se abre entrando el gas en el cilindro durante el resto del movimiento del pistón hacia abajo.

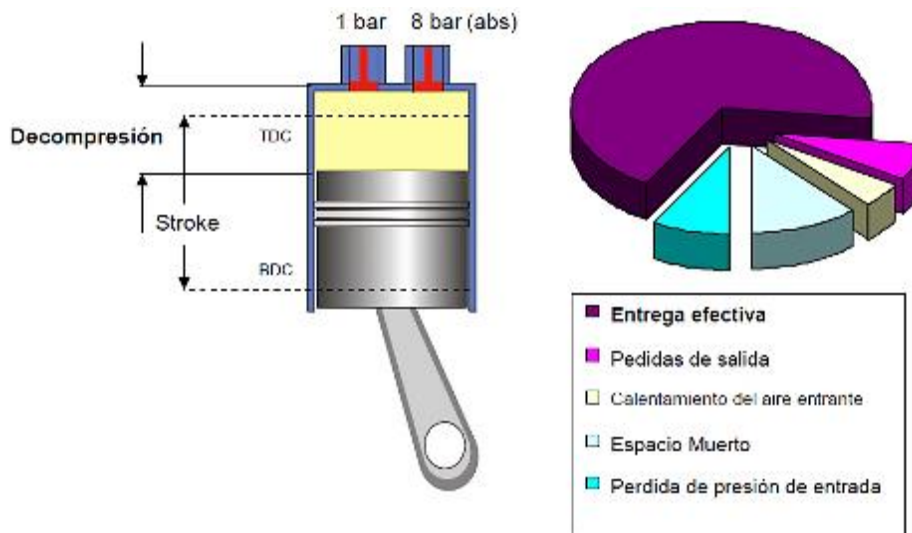


Figura 15 Descompresión del Gas en el Espacio Muerto y Composición del Desplazamiento Teórico. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.4.2 Compresor de Tornillo Lubricado

Un rotor macho y un rotor hembra girando en direcciones diferentes, generalmente llamados tornillos, los cuales están ubicados en una carcasa; solo uno está conectada al motor (macho) y el otro gira por la rotación del macho. Por la razón de diferentes lóbulos las velocidades son diferentes

entre los dos rotores. El aire entra entre los lóbulos y la carcasa y se mueve hacia la salida de aire comprimido. Debido a las diferentes velocidades se reduce el espacio y por lo tanto el volumen del aire. La entrega es continua y sin pulsaciones. La diferencia entre los ángulos y la velocidad de los tornillos es la razón de la disminución de volumen, el aire comprimido es transportado hacia la salida, siempre y cuando se ha llegado a la presión diseñada. El flujo es empujado en forma continua y libre de pulsaciones hacia la salida. La velocidad del tornillo macho en un compresor directamente acoplado es de 1.700 o 3.400 RPM (mundocompresor, 2017).

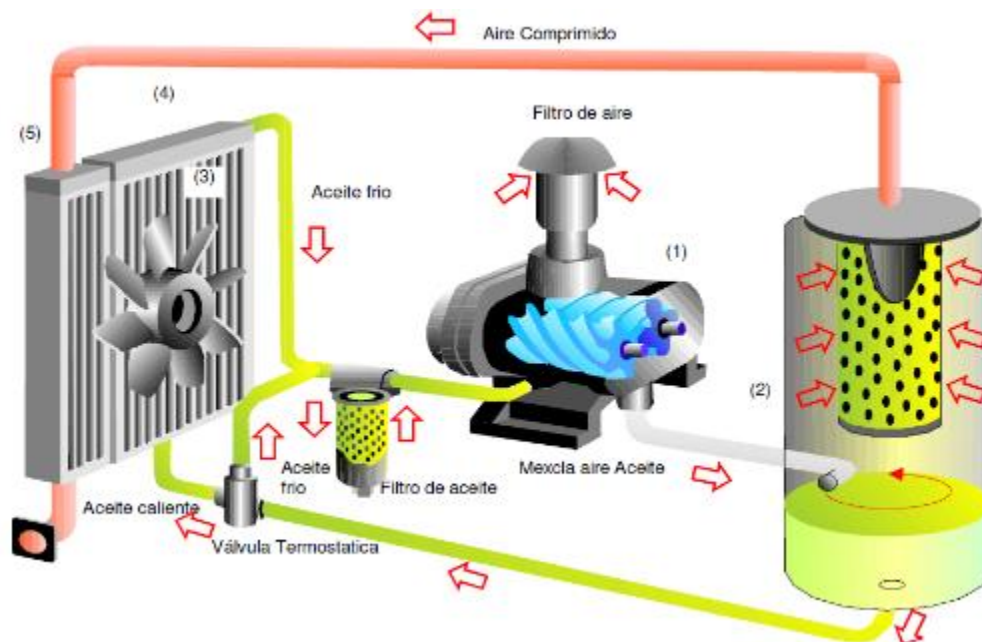


Figura 16 Diagrama de Compresor de Tornillo Lubricado. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

La unidad compresora (1) está conectado al motor eléctrico. El aceite (Lubricante para enfriar) inyectado a la unidad compresora y mayormente para enfriar, es direccionado hacia el estanque separador (2) y el filtro separador, asegurando aire limpio en la descarga.

El ventilador (3) asegura un enfriamiento del equipo y también un flujo de aire frío hacia el enfriador de aceite y el post-enfriador de aire (4 y 5). El controlador asegura que el aire esta producido dentro de sus límites (ej. 7 - 7,5bar). Funciones de seguridad protegen el compresor contra fallas importantes apagando el equipo automáticamente (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

El lubricante del compresor cumple cuatro funciones:

- Enfriar o disminuir la temperatura de descarga de la unidad compresora a 75 °C.
- Lubricar los rodamientos y demás componentes del compresor.
- Sellar lóbulos para evitar pérdidas en la unidad compresora.
- Atrapar contaminantes del aire.

2.4.2.1 Características de los compresores de tornillo

- Caudal: 0,6 a 79,3 m³/min
- Características de flujo: Continuo
- Número de etapas: de 1 a 2
- Rango de presión: 6 a 15 bar (manométrico)
- Revoluciones: 1,700 a 3400 rpm
- Enfriamiento: Aire - Aceite
- Accionamiento: motor eléctrico

2.5 TRATAMIENTO DE AIRE

Las impurezas en el aire que respiramos generalmente no son visibles. No obstante, pueden tener efectos nocivos en el funcionamiento confiable de sistemas de aire comprimido o herramientas neumáticas. El nivel de calidad de aire puede lograrse, pero este depende de los diversos sistemas de producción del aire comprimido.

Cada compresor, libre de aceite o refrigerado con aceite, puede ser comparado con una aspiradora gigante. Esta no sólo succiona oxígeno y nitrógeno, también todas las impurezas en el aire y de no ser tratado el aire pasará en una alta concentración a los sistemas de aire comprimido.



Figura 17 Contaminantes en el Aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.1 Estándar de Calidad de Aire Comprimido ISO 8573-1

Los Estándares internacionales ISO 8573-1 son de gran ayuda para seleccionar correctamente el sistema de producción de aire comprimido y su tratamiento. En este se reemplazan términos de calidad imprecisos como “libres de agua”, “libres de aceite”, o “libres de polvo” por valores numéricos simples y los encaja en tipos de calidad según su definición. Esta tabla clasifica claramente los sistemas individuales de compresión en relación a la calidad del aire producido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

En esta tabla, no se considera el remanente de aceite en el aire comprimido producido por compresores de aceite y libres de aceite. En lo referente a remoción de partículas, el compresor de tornillo lubricado tiene una ventaja en la calidad del aire debido a su filtro integrado de 1 μ m. En cambio, cuando hablamos de contenido de humedad en el aire, ambos compresores son similares, por ejemplo los de la clase 6 entregan aire con 100% de saturación de humedad.

El aire es una mezcla de gases, principalmente nitrógeno y oxígeno, entre otros. Algunos de los principales contaminantes se encuentran de forma natural suspendidos en el aire, tales como: vapor de agua y partículas sólidas (polvo, arena, hollín y cristales de diferentes sales). Los contaminantes que se encuentran en el aire comprimido y son los que causan daños en los circuitos neumáticos y en la máquina.

Las Partículas, el vapor de agua y los aceites usados en la compresión del aire, son agentes abrasivos, además a estos se les une el óxido que se produce o desprende de la red de aire comprimido.

La cantidad de aire comprimido en el punto de consumo (maquina), viene definida por tres parámetros:

- Pureza: Referida a la humedad la suciedad por partículas sólidas contenidas en el aire.
- Presión: Referida al calor adecuado y constante.
- Lubricación.- De acuerdo al área de aplicaciones.

La pureza del aire comprimido está influenciada por:

- Calidad del aire de aspiración.
- Filtro de aspiración.
- Tipos de compresor.
- Mantenimiento del compresor.
- Separador de partículas sólidas contenidas.
- Sistema de distribución.

Todo el aire aspirado por el compresor, contiene una cantidad de agua en forma de vapor que depende de la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

2.5.2 Humedad y Condensado

La mezcla de aire y vapor de agua es llamado humedad y esta puede variar entre los límites de aire seco y aire totalmente saturado.

2.5.2.1 Humedad

La humedad describe el vapor de agua contenido en el aire atmosférico. Este es expresado por humedad absoluta y describe la cantidad actual de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire.

En términos simples, frecuentemente hablamos de la humedad en el aire pero realmente nos referimos a la **humedad relativa**, la cual representa la relación de la humedad absoluta con la humedad máxima.

Humedad máxima describe la cantidad de vapor de agua que un metro cúbico de aire puede sostener a una temperatura definida. Cuando el aire es saturado, por ejemplo, contiene la máxima humedad, la humedad relativa es de 100%. Con el incremento de temperatura, el aire puede capturar más humedad, como se muestra en el siguiente diagrama.

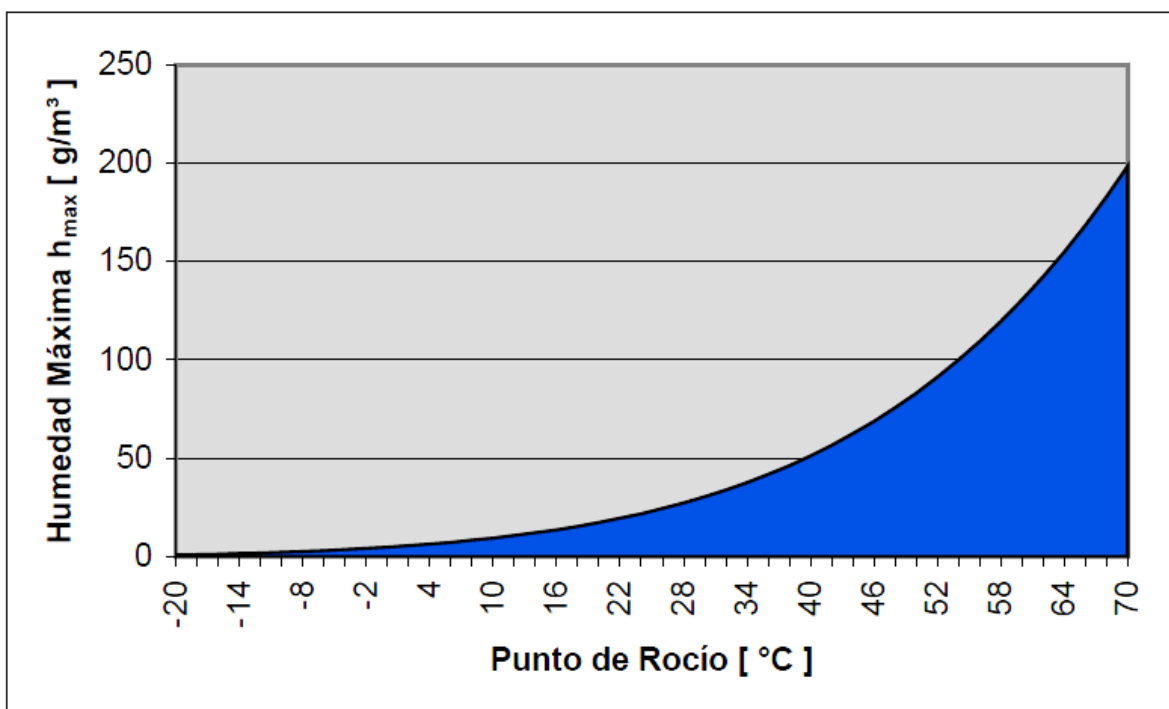


Figura 18 Máxima humedad en el aire relacionada al punto de rocío. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.2.2 Punto de rocío

El punto de rocío del aire atmosférico a 1 bar(a) es llamado punto de rocío atmosférico. Describe el estado saturado al cual el aire tiene la máxima carga de humedad a una determinada temperatura.

Si el aire se enfría por debajo de esta temperatura se formará rocío, por ejemplo, exceso de humedad condensará el agua del aire.

2.5.2.3 Demostración de punto de rocío y humedad

Vamos a asumir que la temperatura en un cuarto es de 20°C con una humedad relativa del 60%. Si un vaso se llena con cerveza a una temperatura de 8°C, el aire alrededor del vaso se enfría y su humedad relativa disminuye. A la temperatura aún mayor que la de la cerveza con la cual se logra una humedad relativa del 100% el aire se satura. Este no puede manejar más humedad y el punto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

de rocío se ha alcanzado. En la medida en que continúe enfriándose, esta habilidad de contener humedad disminuye y se observa condensada en el exterior del vaso. (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).



Figura 19 Vaso de Cerveza a 8 °C y Condensado a su alrededor. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

La calidad del aire puede también verse afectada debido al pobre tratamiento del aire. En algunas aplicaciones, el uso del compresor sin el correspondiente tratamiento del aire es prohibido por generar daños a la salud.

Algunos problemas que podría causar en la red:

- Corrosión
- Caídas de presión
- Contaminación
- Congelamiento
- Mantenimiento

Algunos problemas que podría causar en el proceso productivo:

- Contaminación
- Desgaste de herramienta
- Rechazos
- Tiempo muerto

Finalmente estos problemas se ven reflejados en sobre costos en el mantenimiento del sistema de aire comprimido y pérdidas de producción por calidad del producto.

2.5.3 Separación mecánica inicial

Después del proceso de compresión, el aire que viene mezclado con vapor de agua a una temperatura entre 10 y 15 K por encima de la temperatura ambiente, sufre una primera condensación del vapor de agua y por tal motivo se debe realizar una primera separación por medio

de un separador ciclónico que fuerza el aire en un movimiento circular, se usa para separar el aire comprimido del condensado (turbulencia).

Las partículas de suciedad grandes y las gotas de agua combinadas en el condensado se estrellan contra las paredes del separador por la fuerza centrífuga y caen al drenaje de condensados. El grado de separación que se logra es cerca del 95% a 6 bares, 20°C y el flujo nominal. La caída de presión es aproximadamente de 0.05 bar al flujo nominal.

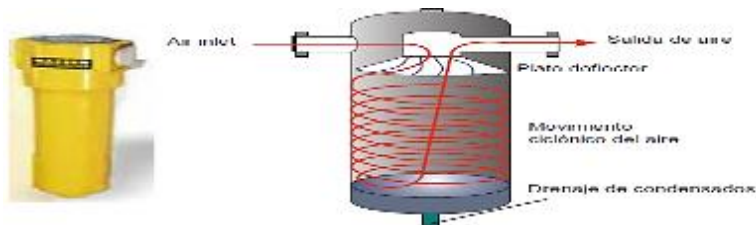


Figura 20 Separador ciclónico de condensados. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.4 Métodos de secado del Aire

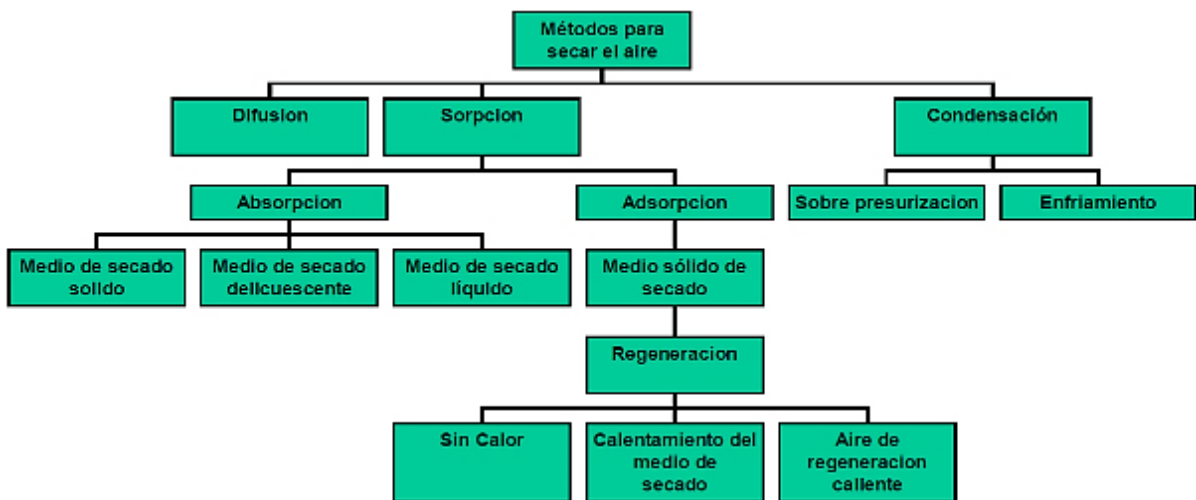


Figura 21 Diferentes Métodos para secado del aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.4.1 Condensación

Es la capacidad del aire para retener vapor de agua, disminuye con la temperatura, por lo que el método más utilizado para secar el aire comprimido, es el de instalar un secador por refrigerativo. De igual forma podríamos bajar la temperatura por medio de la presurización y subsecuente una expansión rápida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.5.4.2 Secado por refrigeración

La capacidad del aire para retener el vapor de agua, disminuye con la temperatura, por lo que el método más utilizado para sacar el aire comprimido, es el de instalar un secador por refrigeración.

El aire comprimido se hace circular a través de una serpentina que por disipación transfiere el calor a la atmosfera a esta serpentina también se la conoce como intercambiador de calor aire-aire, sin embargo el punto de condensación no es alcanzado lo suficiente bajo como para secar el aire, por esa razón se coloca una segunda etapa, en la cual por medio de aire frio se hace disminuir la temperatura del aire entre los + 6 y 3 °C, esto es con el objeto de que se produzca el punto de rocío sin llegar a la congelación de la humedad. El aire frio de la segunda etapa se genera a través de gas refrigerante.

2.5.4.3 Sorción

Remoción o retención de humedad por medio de contacto entre una sustancia y otra.

2.5.4.3.1 Adsorción

Es un proceso físico, donde la humedad es capturada por la fuerza molecular en el secado, el cual consiste en adsorber sustancias sobre la superficie de cuerpos sólidos. Se compone de casi 100 por ciento de dióxido de silicio. En general se le da el nombre de gel. La misión del gel consiste en adsorber el agua y el vapor de agua. El aire comprimido húmedo se hace pasar a través del lecho de gel, que fija la humedad.

La capacidad absorbente de un lecho de gel es naturalmente limitada. Si está saturado, se regenera de forma simple. A través del secador se sopla aire caliente, que absorbe la humedad del material de secado. El calor necesario para la regeneración puede aplicarse por medio de corriente eléctrica o también con aire comprimido caliente. Disponiendo en paralelo dos secadores, se puede emplear uno para el secado del aire, mientras el otro lo regenera (soplado con aire caliente).

2.5.4.3.2 Absorción

Es un proceso químico. La humedad se separa por reacción química con el medio de secado. Este tipo de secado consiste en utilizar sustancias químicas para secar el aire. Se suele utilizar una solución salina NaCl (cloruro de sodio), sabiendo que un kilogramo de sal es capaz de retener 13 kg De condensado aproximadamente. Considerando que el punto de condensado es de 15° C, se pueden utilizar otros químicos como; tiza deshidratada, ácido sulfúrico, glicerina.

2.5.4.4 Filtración

El propósito de la filtración es asegurar que el suministro del aire comprimido esté libre de contaminantes. Debido a que el aire circundante que entra al compresor está contaminado en mayor o menor grado, este debe ser filtrado; el aire comprimido que sale del compresor debe ser filtrado posteriormente para remover cualquier contaminante sólido remanente o partículas de líquido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.5.4.4.1 Filtros de partículas (Filtros de superficie)

Diseñadas para separar partículas sólidas, receptando las partículas sólidas con materiales filtrantes como: espumas, mallas nylon, papel rejilla metálica, etc. Estos elementos se pueden recargar y tienen un tiempo en el que deben ser recargados porque se saturan y ocasionan pérdidas de presión. Retienen partículas de 40 μm a 5 μm según el tipo de cartucho filtrante y su filtración.

2.5.4.4.2 Filtro coalescentes (Filtros de lecho profundo)

Consiste en una red de fibras, la cual ante el paso del aire, produce formación de gotas alrededor de las fibras, cayendo luego estas a un recipiente de acumulación por efecto de gravedad. Como consecuencia del diseño del filtro puede retenerse partículas sólidas incluso de menor tamaño que las retenidas por un filtro de partículas antes que uno coalescentes y así evitar que este se sature.

Estos filtros son capas de fibras entrelazadas de manera heterogénea que combina un número de mecanismos de separación para retener pequeñas partículas. Los mecanismos de separación son:

- Impacto directo
- Carga electrostática
- Adsorción
- Difusión
- Efecto Tamiz

2.5.4.4.3 Filtro de carbón activado

Debido a la contaminación causada por las emisiones de la combustión de las plantas, motores y el uso de aceites refrigerantes y otros materiales de producción. El aire que sale del compresor contiene una alta concentración de hidrocarburos y otras sustancias olorosas. Los hidrocarburos contenidos en el aire atmosférico pueden exceder fácilmente los 10 mg/m^3 bajo ciertas condiciones.

Dependiendo del tipo de compresor, algunos aceites lubricantes se vaporizan en la misma máquina, incrementando el arrastre de aceite al aire comprimido. Este factor aplica tanto a los compresores refrigerados por aceite como a los llamados compresores libres de aceite.

Así como en los casos mencionados arriba, si la aplicación requiere no solamente separación de gotas de aceite precipitado si no también retención de vapores de hidrocarburos, el tratamiento con un simple filtro de partículas de aceite no es suficiente. Obviamente, estos filtros pueden separar fácilmente el aceite condensado del compresor, pero no la contaminación que se encuentra alrededor del compresor y que ingresa al mismo. La solución aquí es la de un filtro o torre de carbón activado. Estos sistemas retienen la mayor parte de la polución, permitiendo que el aire comprimido se use en áreas extremadamente sensibles.

Tabla 7 Norma ISO para los filtros.

CLASE	Impurezas sólidas (número máximo de partículas por m ³) Para un tamaño máximo de partícula indicado en µm			Humedad Punto de rocío a presión °C	Máximo contenido aceite mg/m ³
	0,1<d<=0,5	0,5<d<=1,0	1,0<d<=5,0		
0	Acordado entre suministrador y usuario, pero inferior a clase 1				
1	≤ 20000	≤ 400	≤ 10	≤ -70	≤ 0,01mg/m ³
2	≤ 400000	≤ 60000	≤ 100	≤ -40	≤ 0,1mg/m ³
3	-	≤ 90000	≤ 1000	≤ -20	≤ 1mg/m ³
4	-	-	≤ 10000	≤ +3	≤ 5mg/m ³
5	-	-	≤ 100000	≤ +7	-

Fuente: (Mundo Compresor, 2016).

2.5.5 Drenaje de Condensados

El condensado es un resultado inevitable de la compresión del aire. La condensación de la humedad existente en el aire ambiente causa corrosión en redes de distribución y usuarios finales de aire. Además contiene aceite y partículas de suciedad (herrumbre, por ejemplo) y es parcialmente agresivo atacando las superficies y materiales con los cuales el aire tiene contacto. Esto se puede evitar siempre y cuando se realice una correcta remoción en los puntos de almacenamiento del condensado.

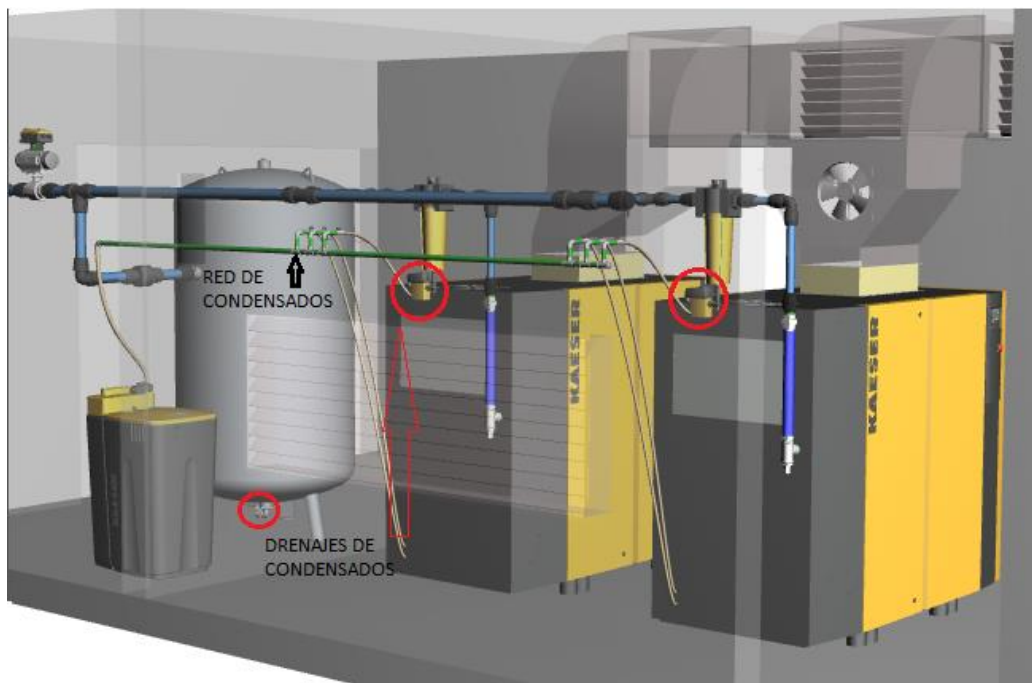


Figura 22 Puntos de ubicación drenajes de condensados. Fuente: propia.

2.5.5.1 Drenaje controlado por flotadores

Los modelos más antiguos de alcantarillado automático condensado emplearon un flotador hueco, mecánicamente se vinculó a una válvula. El nivel creciente de condensado levantaba el flotador, que a su turno abría la válvula para permitir la salida del condensado. Tales dispositivos no requieren ninguna fuente de energía y liberan el condensado esporádicamente a medida que acumula.

La fuerza de levantamiento del flotador es equivalente al volumen de líquido que este desplaza menos el peso del flotador en sí mismo. El flotador por lo general está vinculado a una palanca para producir bastante fuerza que permite abrir una válvula del tamaño adecuado, tal es ilustrado abajo.

Características:

- El drenaje solo tiene lugar cuando suficiente condensado se ha acumulado.
- No hay pérdida de aire comprimido.
- Un mantenimiento regular es esencial ya que las partículas pueden causar que el mecanismo se obstruya.
- No hay medio de obtener una señal que confirme que el condensado ha sido agotado o que una falla ha surgido.

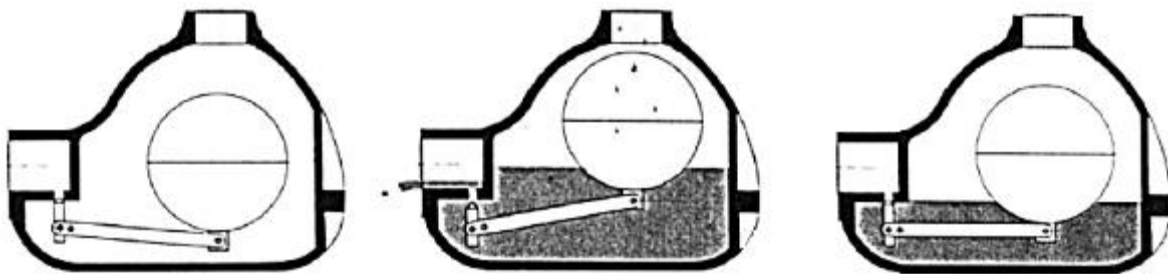


Figura 23 Drenaje por flotador de nivel. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.5.2 Drenajes con control de nivel electrónico

Estos dispositivos están equipados con un sensor de nivel y están más vinculados a drenaje de condensado que a drenajes controlados con flotadores. La válvula solenoide se abre solamente cuando se ha acumulado el suficiente condensado y se cierra otra vez sin pérdida de aire comprimido tan pronto como se drene. Partículas de suciedad quedan en el receptáculo y no se pueden bloquear la válvula, y el receptáculo se debe quitar para una necesaria limpieza. La cubierta del drenaje es generalmente de aluminio, de acero inoxidable o de plástico resistente. Algunas versiones están disponibles para el uso en ambientes explosivos.

Características:

- Sensor de nivel capacitivo

- Ajuste automático de presión
- Autocontrol con contacto auxiliar disponible para alarma.



Figura 24 Drenaje por sensor de nivel Eco-drain. Fuente: (KAESER, s.f.).

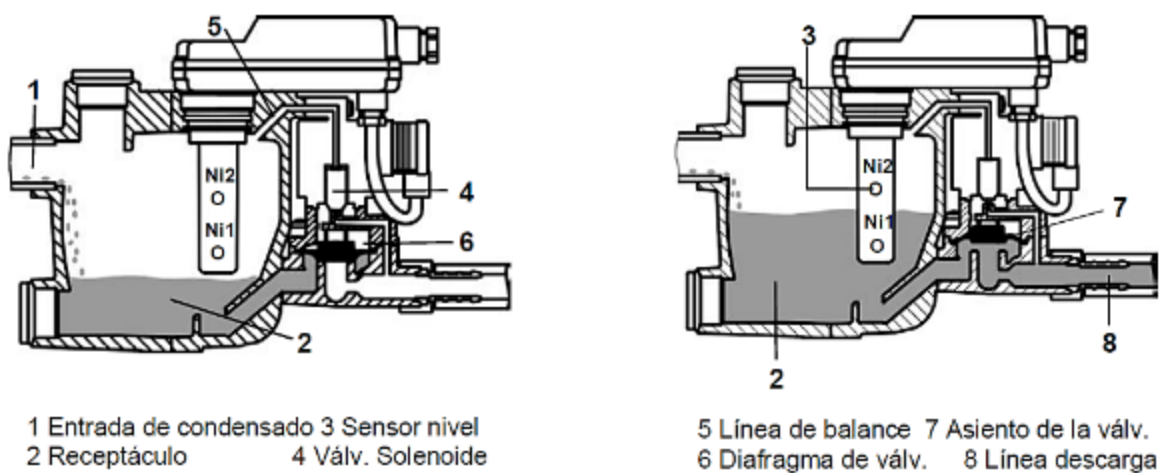


Figura 25 Partes drenaje por sensor de nivel Eco-drain. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.5.3 Instalado de Drenaje de Condensados

El drenaje de condensado más confiable no será satisfactorio si no es instalado correctamente, y es aquí donde surgen los errores más comunes.

Deben seguirse las siguientes reglas básicas:

- No una varios puntos de recolección de condensado a un drenaje en común, ya que diferenciales de presión pueden causar un efecto bypass.
- El condensado sólo puede fluir en el receptáculo cuando se le permite al aire, ya en el receptáculo, a salir, usualmente de regreso a la fuente de condensado, mediante una línea de compensación separada.
- El condensado sólo puede fluir a una línea de aire comprimido.

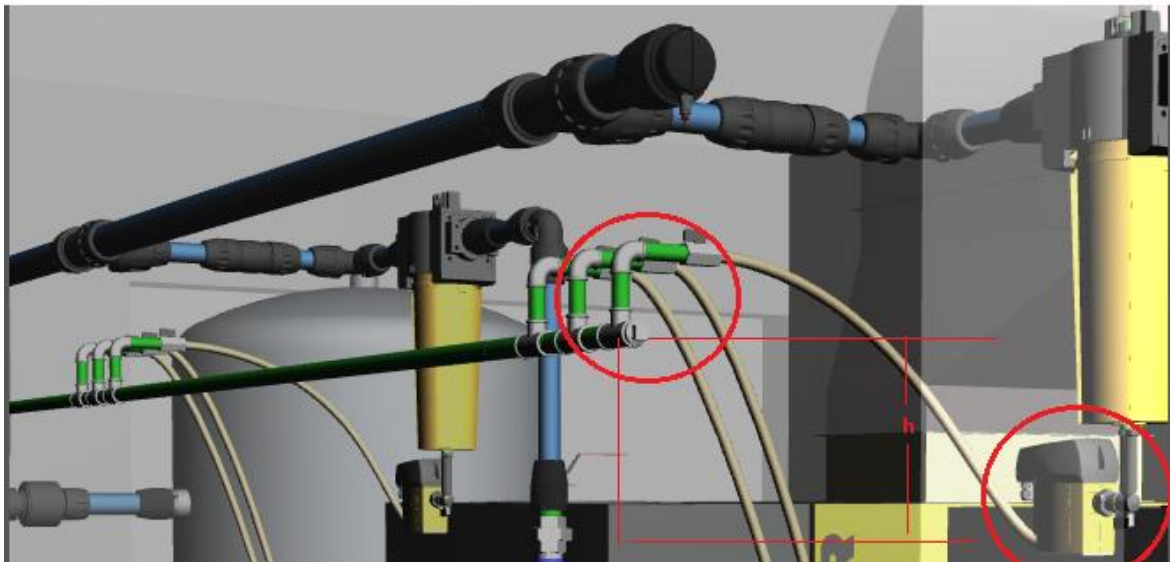


Figura 26 Montaje real de un drenaje de condensados Eco-drain. Fuente: propia.

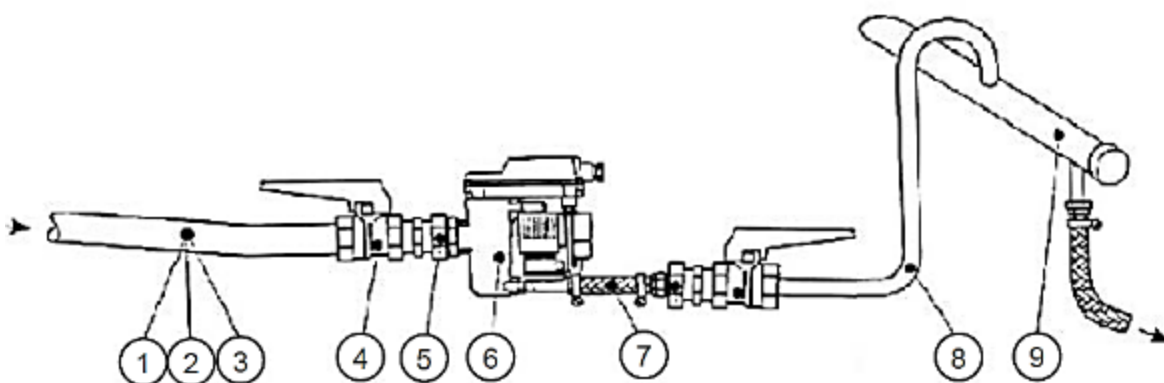


Figura 27 Ejemplo Montaje drenaje de condensados Eco-drain. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

- 1) Tubo de admisión.
- 2) Filtro no instalado.
- 3) Inclinación > 1%.
- 4) Válvula de cierre.
- 5) Conexión: accesorio cilíndrico únicamente (de acuerdo al fabricante).

- 6) Presión mínima. 0.8 a 1.2 bar (presión indicada en la placa).
- 7) Manguera de descarga corta y transparente (conexión flexible e indicador de flujo visual).
- 8) Cada 1 m de elevación vertical en la descarga incrementa la presión mínima 0.1 bar. Elevación máxima 5 m. La conexión realizada a la línea de recolección sin modo de regreso, ej.: cuello de cisne).
- 9) Línea de recolección con inclinación > 1%.

2.5.5.4 Errores en la instalación

- Presión diferencial:
Cada recolector de condensado debe tener su propio drenador.

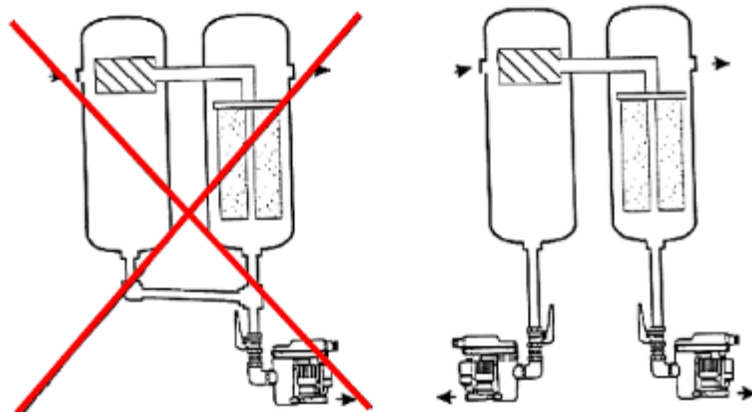


Figura 28 Drenaje en Común Trabaja como Bypass. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

- Ventilación:
Una línea de equilibrio debe ser instalada si no es posible conseguir la inclinación necesaria.

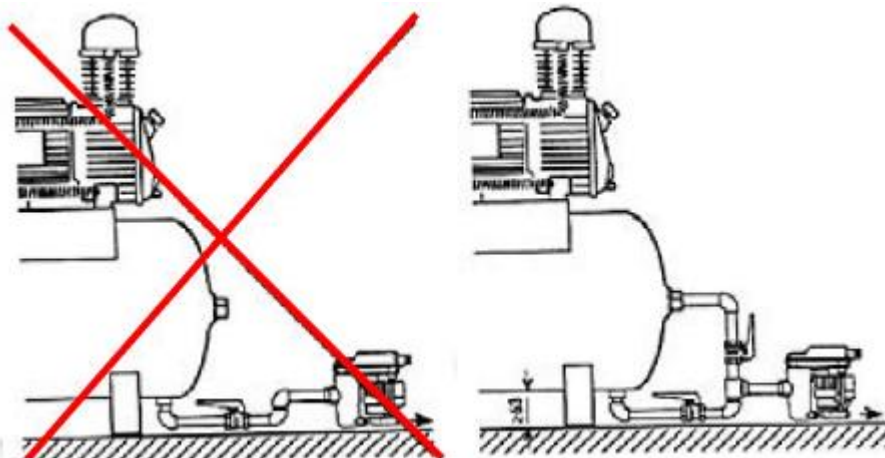


Figura 29 Inclinación Inadecuada dificulta el drenado. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

- Inclinación continua:
Se debe tener mucho cuidado de no crear una trampa de agua.

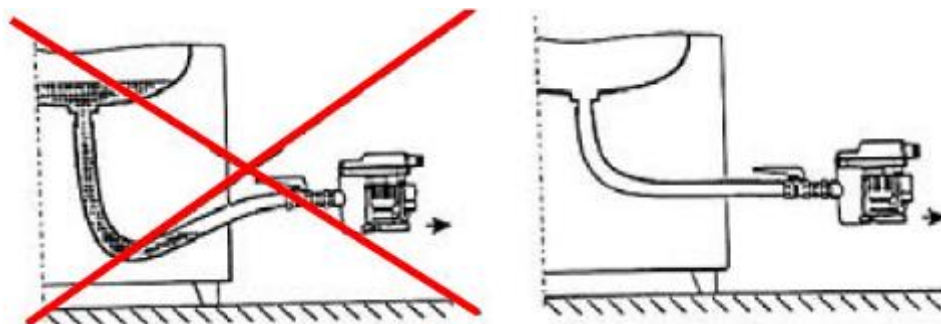


Figura 30 Baja Inclinación Evita Trampas de Agua. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.5.5.5 Tratamiento de Condensados

El condensado es principalmente agua con aceite mezclados en donde el aceite es parcialmente una dispersión micro fina y parcialmente una emulsión estable. La inclusión de partículas de suciedad, dióxido de sulfuro, cobre, plomo, hierro y otras sustancias hacen de este condensado una mezcla potente.

Hidrocarburos también son encontrados en el condensado, principalmente en las dos formas indicadas pero también en la tercera forma bajo ciertas circunstancias.

- Libres: sin disolver y no emulsionados que pueden ser separados por gravedad mientras que son suficientemente menos densos que el agua → pH: 6-9.
- Emulsionadas: donde puede hacer una distinción entre emulsificación mecánica (Condensado forzado o bombeo) y emulsificación química del efecto de una sustancia en la superficie (solvente o componentes de tensión superficial en la entrada de aire) → es necesaria la neutralización.
- Hidrocarburos disueltos: dependiendo del tipo, solubilidad y temperatura. Estos últimos no son visualmente reconocibles y aparecen como resultado de una limpieza con un agente a base de petróleo o si dichas sustancias son liberadas en un proceso y encuentran un modo de ingresar en la toma de aire a través del compresor. → pH 3-6.

Todo el condensado debe ser tratado por disposición conforme a regulaciones de protección de medio ambiente locales.



Figura 31 Condensado Aceitoso. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

El agua parcialmente limpia pasa a través de un tubo (4) y un pre filtro (5). Un sensor de nivel mide el nivel de contaminación (6). Posteriormente los condensados fluyen al filtro de absorción (7) donde el remanente de aceite es removido y el agua limpia es evacuada de la unidad por medio del tubo de evacuación (8). El aceite que ha sido separado es recolectado en un recipiente especial por medio del tubo barredor (9). Muestras de calidad de agua pueden ser tomadas del punto de prueba (10).

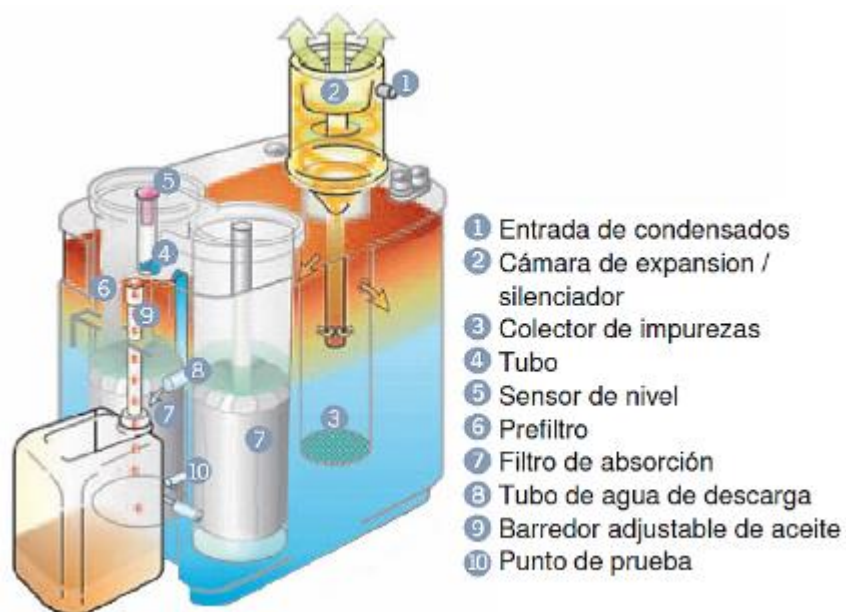


Figura 32 Funcionamiento Aquamat .Fuente: (KAESER, s.f.).

2.6 Calidad de Aire según el tipo de Industria

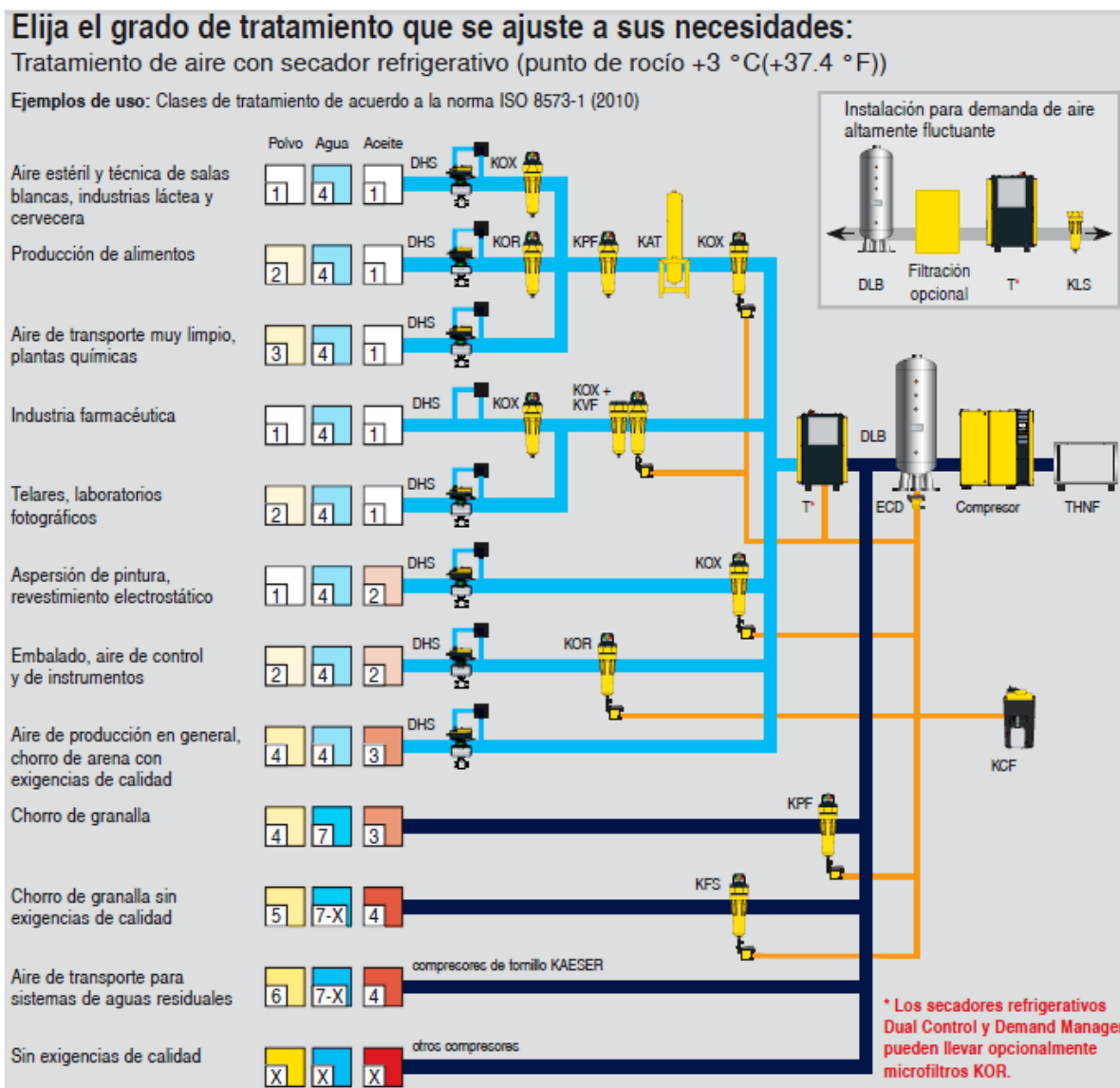


Figura 33 Tratamiento de Aire dependiendo el tipo de industria. Fuente: (KAESER COMPRESORES, s.f.).

2.7 Distribución del aire comprimido

2.7.1 Tubería Principal

La tubería principal es la que une el depósito de aire comprimido con el centro principal de consumo. Este sector debe contar siempre con reservas suficientes para posibles ampliaciones.

2.7.2 Tubería de distribución

La tubería de distribución reparte el aire comprimido dentro de una red de puntos de consumo. Puede tratarse de una tubería recta o anular o bien de una anular con tuberías rectas integradas.

Existen diferentes tipos de distribuciones entre las cuales tenemos:

- Distribución en anillo: Las tuberías anulares tienen la ventaja de permitir secciones pequeñas. Pueden dimensionarse para la mitad del flujo volumétrico con la mitad de longitud nominal.

Para su instalación es importante contemplar posibilidades de corte selectivo e instalar tramos intermedios para D_p demasiado altas.

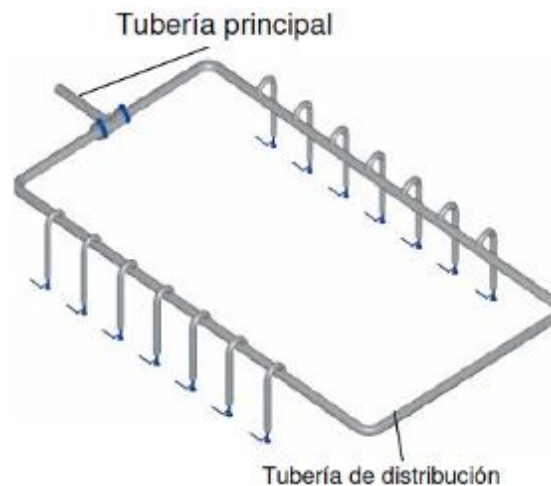


Figura 34 Distribución en anillo. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

- Distribución mallada: Son aquellos sistemas anulares en los que se instalan tuberías transversales o longitudinales adicionales a la tubería de distribución. Las ventajas son las mismas que las de un sistema anular. En estos sistemas es fácil cortar el paso de aire a los distintos sectores.
- Tubería Recta: Este tipo de tuberías tiene la ventaja de que el gasto en materiales es menor. Para su instalación es importante mayores diámetros de tubería que en los sistemas anulares. Se debe ampliar a sistema anular en caso de D_p demasiado altas (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

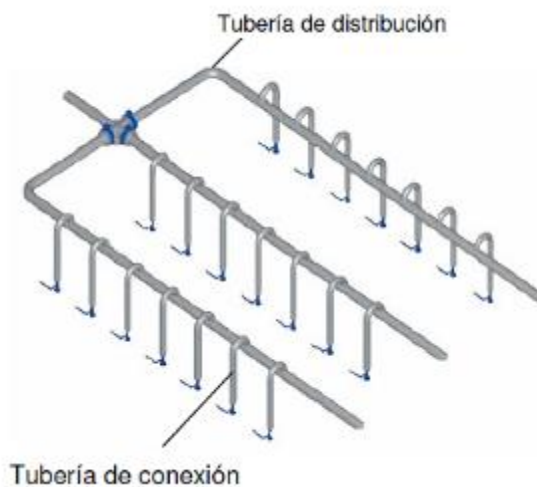


Figura 35 Distribución en malla. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

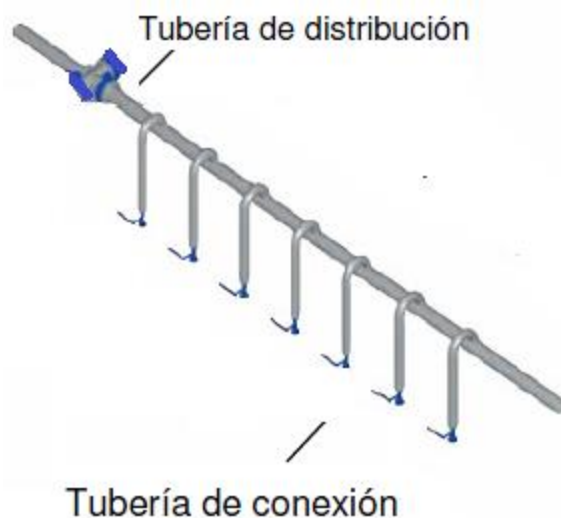


Figura 36 Distribución recta. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

2.7.3 Transporte del aire comprimido

Así como las instalaciones eléctricas requieren exigentes cálculos que garanticen la calidad del suministro energético, la seguridad de las personas, infraestructura, y equipos de igual forma las instalaciones neumáticas requieren el mismo tratamiento para transportar este tipo de energía.

En la práctica demuestra que los sistemas de distribución del 80 % de las empresas son el punto más débil del sistema de aire comprimido. En el caso de los sistemas de distribución de aire comprimido, por el contrario, se ha venido improvisando en muchos de los casos, sobre todo en el pasado. (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Los puntos más importantes en la planificación son el flujo volumétrico y la pérdida admisible de presión.

La caída de presión en medios líquidos y gaseosos en los sistemas de tuberías es consecuencia del rozamiento interno. La acción dinámica de la fuerza entre las moléculas y el rozamiento del medio con las paredes internas de la tubería hacen que se produzca una pérdida de energía que se manifiesta como una pérdida de presión. Además del medio que forma la corriente, hay que tener en cuenta otros factores para la caída de presión:

- Dimensionado demasiado reducido de las tuberías de aire comprimido
- Trayectoria no lineal de las tuberías
- Conexiones y empalmes de las tuberías
- Turbulencias (número de Reynolds alto)
- Tuberías muy largas
- Superficie interna de las tuberías rugosa

2.7.4 Materiales para el transporte del aire comprimido

Así como la tecnología ha ido evolucionando y con ello la industria, el aire comprimido cada vez se vuelve más importante en los procesos industriales.

Por esto en Colombia de casa 2 décadas para acá (año 2000) se empezaron a hacer cosas diferentes y se empieza a trabajar en sistemas eficientes de aire comprimido. Dentro de estos sistemas hace parte fundamental las redes de aire comprimido por donde se transporta esta energía y se vuelve indispensable así como en los sistemas eléctricos generar la menor pérdida posible por dicho transporte el cual se ve reflejado en caídas de presión y falta de caudal de aire.

2.7.4.1 Acero al carbono

Inicialmente (Siglo XVII al Siglo XX) se empezó a transportar aire en tuberías en acero al carbono por su resistencia a altas presiones y fácil de conseguir, con una desventaja y es el costo de mtto ya que se requerían recambios en ciclos de 4 años ya que esta tubería con el tiempo se deterioraba a causa del condensado generando corrosión, reducción de diámetros, fugas en el sistema y caídas de presión.

2.7.4.2 Acero galvanizado

En este mismo periodo con la revolución industrial se empezó a tratar este acero y se utilizó la tubería galvanizada, si bien es cierto esta tubería tiene un recubrimiento en zinc que retrasa el proceso de corrosión solo retardaba por un par de años más los recambios de tubería y las fallas que presentaba el acero al carbono, pero al final se tenía el mismo resultado y era un sistema poco eficiente y con muchas fallas en el punto final de uso.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

2.7.4.3 Acero inoxidable

Del año 2000 hacia acá se empezó a implementar en algunas industrias y sobretodo en alimentos y químicas las redes de aire neumáticas en acero inoxidable.

Estas redes al parecer acababan con las fallas que se presentaban con las redes anteriores, pero con unos costos muy elevado en materiales, la instalación se podría demorar entre 2 y 3 meses más que el resto de montajes y la mano de obra debería ser muy calificada ya que la mayoría de esta tubería debía ser soldada debido a la dificultad para roscar el material.

2.7.4.4 Polímeros

Con el desarrollo de los polímeros en esta misma época se empiezan a trabajar redes en varios polímeros, dentro de los que se llegaron a utilizar el PVC, con un alto riesgo en seguridad ya que en periodos muy cortos de 2 años después de la instalación se empezaban a generar revientes en la tubería representando un riesgo para el proceso y las personas que hacen parte de él. De igual forma se utiliza el polietileno (en construcción y minería) y polipropileno (Pequeña y mediana industria).

2.7.4.4.1 Polipropileno

Para la década del 2010 Este último material utilizado polipropileno tenía un poco más de resistencia retardando las fallas presentadas con el PVC pero en diámetros superiores a 1" ½ representa un riesgo de seguridad para los sistema ya que el peso de los accesorios de la red como válvulas, filtros, separadores ciclónicos, drenajes entre otros ejercen unas tenciones que pueden reventar la tubería.

Presenta además una desventaja y es que en las uniones de cada accesorio se presenta una reducción de la sección transversal de la tubería ocasionando un flujo turbulento y causando pérdidas de presión, esto se ve reflejado en mayor consumo de energía en el sistema de generación de aire comprimido.

2.7.4.5 Aluminio

En esta misma década muchas empresas especialistas en fabricación de redes empezaron a trabajar en un material que les diera la resistencia del acero, la virtud del acero inoxidable de no corroerse ante el contacto con el agua, que fuese liviano y que los costos en inversión inicial fueran los más apropiados.

Finalmente el aluminio es material adecuado para transportar este fluido ya que cumple estas características, además que la rugosidad relativa del material es muy baja reducido a los niveles más bajos las perdidas por fricción entre el aire y el interior de la tubería.

Así como el cobre es el material más adecuado para transportar energía eléctrica, el aluminio se convierte en ese material que durante décadas se estuvo buscando para transportar el aire comprimido.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Es importante resaltar algunas diferencias existentes entre estos materiales, el objetivo es que dependiendo el alcance de cada sistema de aire comprimido se realice la mejor selección del material adecuado para la red neumática.

Tabla 8 Características de los diferentes tipos de materiales.

SISTEMAS DE TUBERÍA DE AIRE COMPRIMIDO			
Cuadro comparativo			
Producto:	Kaeser SmartPipe™	VESBO	ACERO
Material			
Pipe	AL 6063-T5	Polipropileno PPR Tipo 3	Acero Carbono / Galvanizado
Fittings	Nylon 66		
Fitting Seal	Double Lobe Nitrile		
Especificaciones Técnicas			
Operating Pressure - psig	232	232	up to 1000
Working Temperature max. - °C	60	60	up to 200 °C
Working Temperature min. - °C	-20	0	N/A
Color Code	AZUL / VERDE / GRIS	VERDE / AZUL	NO
Tamaños disponibles			
Pipe Size - mm	16, 25, 40, 63, 76, 100, 168	20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 160	20,25,32,40,50,65,76,80,90,100,108, up to 600
Pipe Length - m	3 y 6	4 y 6	6
Compatibilidad con fluidos			
Compressed Air	SI	SI	SI
Vacuum	SI	SI	SI
Inerte Gas	SI	NO	SI
Water	NO	SI	SI
Potable Water	NO	SI	SI
Oil	NO	NO	SI
Forma de acoplamiento			
Connection Fitting	Acople rápido / El diámetro se mantiene constante en todas las conexiones	Termofusión / el diámetro interno de la tubería se reduce en todas las conexiones	Roscado / Soldado

Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Tabla 9 Diferencias técnicas de los materiales.

SMART PIPE	POLIPROPILENO	ACERO GALVANIZADO
Velocidad de instalación 13,7 m/ h	Velocidad de instalación 9,4 m / h	Velocidad de instalación 1,8 m / h
Rugosidad absoluta 0,015mm	Rugosidad absoluta 0,027 mm	Rugosidad absoluta 0,1 – 1mm
No se oxida ni corroe	No se oxida ni corroe	En sectores donde se corta o mecaniza pierde el recubrimiento de zinc y se produce corrosión
Peso tubo de 63mm (2 1/2 in) 6.25Kg	Peso tubo de 2" SCH40 8,9Kg	Peso tubo de 2" SCH40 32Kg
Condiciones de flujo constantes con el paso del tiempo	Condiciones de flujo constantes con el paso del tiempo	Con el paso del tiempo se aumenta la caída de presión y se traduce en mayor consumo de energía eléctrica

Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Algunos de los materiales presentan reacción al contacto con la humedad y el condensado ocasionando un deterioro interno que no es visible fácilmente cuando el sistema está en operación.

La textura interior determina la fricción y por tanto las caídas de presión. Superficies rugosas o cambios bruscos de sección causan un mayor flujo turbulento.



- Genera material particulado en el aire disminuyendo la calidad del aire entregado afectando los equipos de aire.
- La corrosión forma depósitos que reducen el área y aumentan la fricción, incrementando las pérdidas de presión en la línea y por consiguiente el consumo de energía de los compresores.

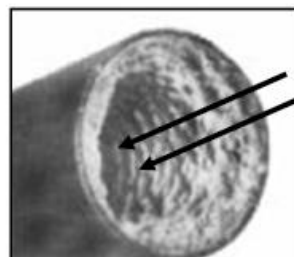
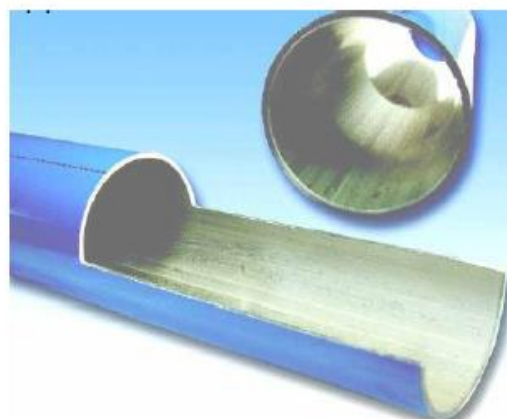


Figura 37 Efectos de la corrosión causada por el condensado. Fuente: (KAESER).



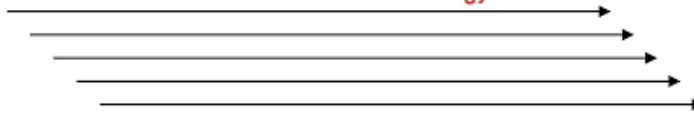
ACERO AL CARBONO



Aluminio anodizado Samrt-Pipe

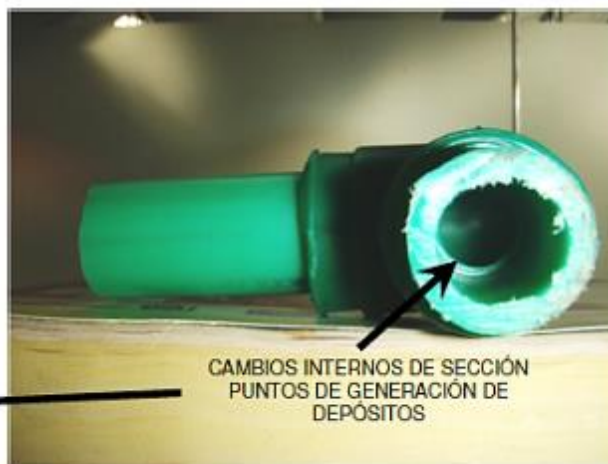
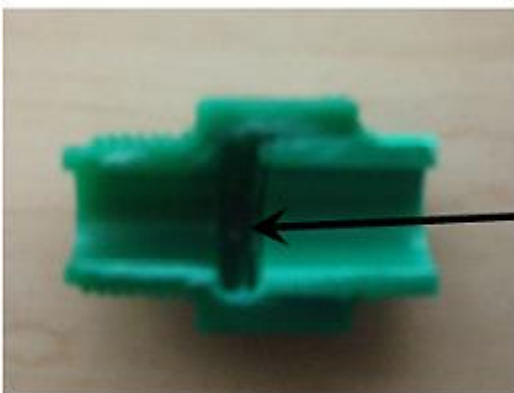
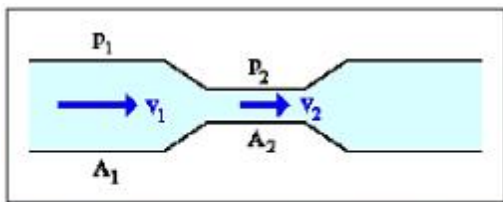
Figura 38 Tubería con de 5 años de operación. Fuente: (KAESER, s.f.).

Laminar air flow: Efficient transfer of energy.



Turbulent air flow = Loss of energy.

Figura 39 Eficiencia del tipo de flujo. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).



CAMBIOS INTERNOS DE SECCIÓN
PUNTOS DE GENERACIÓN DE
DEPOSITOS
SECCIÓN INTERNA ACCESORIO PP

Figura 40 Cambios bruscos de sección en tubería Polipropileno. Fuente: (KAESER).

2.8 Almacenamiento de aire

El tanque de aire es uno de los componentes más vitales en un sistema de aire comprimido. Este sirve como refrigerador del aire, separador de condensados, amortiguador de pulsaciones y como reserva. Así como un tanque de aire grande puede mejorar las condiciones económicas del sistema de aire comprimido, uno demasiado pequeño puede impedir el funcionamiento correcto del mismo.

Teniendo en cuenta que dentro de sus funciones esta separar el condensado se recomienda que el tanque sea galvanizado por dentro y por fuera, debido a que esto evitaría la corrosión del mismo y el desprendimiento de partículas que puedan afectar el proceso. Adicional debe llevar su respectivo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

drenaje automático por sensor de nivel que evacue el condensado que en su momento se acumule y que permanezca dentro del tanque el menor tiempo posible.

El dimensionamiento del tanque se puede realizar como acumulador de reserva el cual en determinado momento del proceso requiera una cantidad de aire bastante alta que sea por un corto tiempo (1 a 5 min).

También se puede dimensionar dependiendo la frecuencia permisible de entrada de carga y vacío y/o arranques del compresor que en un sistema común pueden estar entre 60 ciclos de carga por horas (Esto depende de la potencia del compresor).



Ilustración 32. Tanque Pulmón. Fuente: *(Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012)*.

El tanque por almacenar un gas a alta presión se debe tener en cuenta la certificación de almacenamiento de energías peligrosas según norma americana (ASME) y europea (TÜV) las cuales nos garantizan la seguridad en las instalaciones y las personas.

2.8.1 Cálculo del tanque de aire como acumulador

Con el fin de ahorrar energía no es aconsejable proporcionar una gran capacidad de almacenamiento en forma de diferencial de conmutación, es mejor y más económico proporcionar un tanque acumulador dimensionado correctamente, el tamaño del cual puede ser calculado como se indica a continuación:

$$V_B = \frac{V^0 * t}{P_A - P_E}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Donde:

V_B = volumen del tanque acumulador (m^3)

V^o = flujo volumétrico (m^3/s)

t = tiempo (s)

P_A = Presión inicial en el tanque (bar)

P_E = Presión final en el tanque (bar)

2.8.2 Calculo del tanque dependiendo de la frecuencia permisible de entrada en carga del compresor

Un adecuado tanque acumulador puede servir para reducir la frecuencia de arranque (entradas en carga) del compresor. El diferencial de conmutación de un sistema debe ser mantenido lo más bajo posible, sin embargo no se debe ignorar la máxima frecuencia de arranque del compresor. El volumen del tanque requerido para tal efecto se calcula como de la siguiente manera:

$$V_B = \frac{V^o * (A - A^2)}{Z * \Delta p}$$

Donde:

V_B = volumen del tanque acumulador (m^3)

Δp = Diferencia de conmutación del control del compresor (bar)

Z = máxima frecuencia permisible de entrada en carga del compresor en operación continua o el número máximo de arranques del compresor.

V^o_1 = entrega del compresor en (m^3/h)

V^o_2 = Demanda de aire de la operación (m^3/h)

A = es V^o_2 / V^o_1 factor de utilización, si V^o_2 no es conocido o fluctuante utilice $A= 0,5$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se partió de las características del sistema de aire comprimido existente en uno de los talleres del metro de Medellín, el cual posee una red de aire comprimido con los implementos básicos, para el mantenimiento de este tipo de coches. Adicional se tuvo en cuenta otros equipos de nueva tecnología que posee el sistema y las posibles ampliaciones, según los planos suministrados por el contratista, pero se dejó a nuestra disposición la distribución final del taller y la ubicación de cada punto de trabajo del tranvía Ayacucho.

Las características del sistema, se definieron por las condiciones ambientales del lugar donde estarán ubicados los equipos y se consideraron variables del proceso, como presión de trabajo de los equipos, caudal total de aire y calidad de aire. Se seleccionó tecnología de punta para cumplir con las necesidades de calidad, eficiencia energética y costo.

Posteriormente a esto se desarrolló toda la fase de ingeniería, donde se realizaron los cálculos de presión y caudal mínimo necesario para el sistema, se seleccionó el tipo de tubería y diámetro comercial disponible, basados en la mayor demanda posible del sistema; Por último se realizó la selección de los equipos para el tratamiento de aire.

La selección de todos los equipos se realizó en base a los distintos tipos de tecnología disponibles en el mercado que satisfagan la necesidad actual. Aquí se involucran fabricantes de equipos que propongan ahorro energético, sistemas más económicos en precio y mantenimiento; además equipos que generen menor impacto ambiental y que cuenten con un buen respaldo técnico.

El desarrollo ingenieril comenzó con la programación de una serie de actividades para la ejecución del proyecto, cuyo objetivo es calcular el tiempo que llevará su realización, así como las actividades y tareas críticas que lograrán su culminación. El diseño de la instalación mecánica comprendió principalmente el dimensionamiento de la red de aire, su disposición y los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento (como válvulas bypass, de seguridad o de prueba para la instalación), así como la distribución en la red para la recolección de condensados.

Por otro parte, el diseño de la instalación eléctrica se basó en las recomendaciones de protección y cableado de potencia requerido para la conexión de los estos equipos, ya que el sistema de control viene generalmente incorporado a ellos. El sistema eléctrico de potencia requerido para la operación del sistema es suministrado por parte del usuario final bajo las indicaciones dadas por el fabricante de los equipos según normas internacionales.

Por último, se documenta el proyecto con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema de aire comprimido, se realizaron las memorias de cálculo y planos correspondientes de tuberías e instrumentación (P&ID) y ubicación de los equipos en el taller.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Una vez obtenido el diseño de la instalación, se solicitó al contratista respectivo el montaje y suministro de materiales para la ejecución del proyecto. Posterior al montaje se debe coordinar con el cliente el arranque y puesta en marcha del sistema, así como la prueba de estanqueidad del sistema y capacitación del personal que quedara a cargo de operarlo, con su respectivo manual de mantenimiento y reparación.

4. CÁLCULOS Y DISCUSIÓN

4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Para realizar una correcta selección del sistema de aire comprimido se tuvo en cuenta las siguientes variables:

- Definir las condiciones ambientales donde estará ubicado el equipo
- Determinar el caudal de aire requerido en el proceso, teniendo en cuenta: horas de trabajo por equipo, factor de ocurrencia o simultaneidad, posibles ampliaciones del sistema, fugas, reserva y errores de cálculo.
- Determinar el diámetro mínimo de la red de aire, para el caudal mínimo requerido en el proceso y la ubicación de los equipos.
- Cuantificar las caídas de presión por el sistema de tratamiento de aire y en la red del sistema por accesorios, equipos, etc.
- Determinar la presión de trabajo en la estación de aire
- Seleccionar el compresor teniendo en cuenta la presión de trabajo y el caudal de aire requerido para el proceso.
- Seleccionar el tipo de secador y tratamiento que se le dará al aire, teniendo en cuenta la normatividad ISO 8573-1 (2010) según su proceso productivo.
- Calcular las dimensiones del tanque de almacenamiento, para la estación de aire comprimido, teniendo en cuenta todas las variables de presión y caudal necesarios.

Para el taller del tranvía Ayacucho, se requiere de unas instalaciones de características similares, al taller del metro de Medellín, con lo referente a la calidad del aire, debido a las herramientas neumáticas a utilizar y procesos de pintura a realizar.

Teniendo en cuenta que el consumo de aire comprimido, en el tranvía de Ayacucho, podría ser el doble del taller del metro de Medellín, se estima un consumo de 15.000 cf/día, aplicando la proyección de crecimiento a 10 años y un 40% de aire adicional para máquinas especiales.

Estas instalaciones requerirán, 8 h/día de aire aproximadamente (4 horas en el día y 4 horas en la noche) con el fin de suministrar aire, para los puntos de consumo en el taller, vías de mtto, laboratorios y demás puntos indicados en planos.

Según los requerimientos del área de ingeniería, se propuso una adición al sistema por crecimiento futuro del taller o del parque automotor, que a futuro pueda ser controlado y monitoreado a través de un sistema scada o similar y que la red de aire principal y del cuarto no requiera ser modificada en caso de que se aumente la demanda de aire del taller tranvía Ayacucho.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

4.1.1 Definición de las Condiciones Ambientales de la Ubicación del Equipo

El sistema de aire comprimido estará ubicado en el taller de mantenimiento de la estación Miraflores del tranvía Ayacucho, en la ciudad de Medellín del departamento de Antioquia. El cual tiene las siguientes condiciones ambientales.

- Presión atmosférica: 12,3 psi
- Temperatura: 28 C
- Altitud: 1.475 m.s.n.m.
- Humedad Relativa: 70%
- Porcentaje de pérdidas ambientales: 19%

Algunas variables para tener en cuenta para el diseño serán las siguientes: la presión más importante del sistema, es la presión manométrica que puede entregar el equipo, de esta depende el buen funcionamiento de los sistemas neumáticos. Por esto si el equipo va a ser ubicado en un sitio donde la presión atmosférica sea baja, el compresor tendría que trabajar más para llevar el aire a la presión de trabajo.

Con lo relacionado a la temperatura, a mayor temperatura mayor trabajo requerido para la compresión, por lo que se obtienen consumos mayores para el mismo caudal producido o menor caudal para el mismo consumo. Esto se justifica por el mayor volumen que ocupa un gas a mayor temperatura, así como por la mayor resistencia que ofrecen las partículas a ser comprimidas.

Por otro lado el impacto negativo, que puede representar la humedad contenida en el aire, para el proceso de compresión, obligando a que el equipo trabaje más por comprimir un elemento que no es deseable en el aire, para posteriormente ser retirado por el sistema de tratamiento. Adicional el grado de humedad ambiental afecta en la fase de secado. A las presiones de trabajo por baja que sea la humedad ambiental, el aire sale del compresor saturado de humedad de hecho es habitual situar un colector de condensados en el cuerpo del compresor, antes de la descarga de aire, para evitar que la humedad se condense en las tuberías (Fuster, 2013).

4.1.2 Determinar el Caudal de Aire Requerido en el Proceso

Para determinar el caudal de aire requerido, se cuantifican y definen los sistemas neumáticos a alimentar en cada uno de los procesos, basados en información proporcionada por el tranvía de Ayacucho. Adicional a esto se realizara una verificación con los planos de planta de todo el sistema, para saber correctamente la ubicación final de los equipos.

El taller de mantenimiento del tranvía de Ayacucho, contara con 3 niveles dentro de los cuales estarán distribuidos los usuarios de la siguiente manera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 10 Condiciones Ambientales según el lugar de trabajo.

**Efecto de las condiciones ambientales en la entrega de aire de los compresores
para diferentes ciudades de Colombia**

CIUDAD	Condiciones ambientales de sitio					Porcentaje de pérdida
	Altura snm metros	Presion atmosférica psi(a)	Temp Ambiente °C	Temp Ambiente °F	Humedad relativa	
Arauca	124	14.5	36	96,8	95%	8%
Armenia	1500	12.3	30	86,0	80%	20%
Barrancabermeja	75	14,6	40	104	90%	9%
Barranquilla	1	14.7	35	95,0	90%	7%
Bogotá	2600	10.7	22	71,6	75%	28%
Bucaramanga	960	13.1	30	86,0	85%	15%
Cali	997	13.0	32	89,6	85%	16%
Cartagena	1	14.7	35	95,0	90%	7%
Cúcuta	325	14.1	36	96,8	80%	10%
Florencia	242	14.3	32	89,6	80%	7%
Ibagué	1246	12.7	30	86,0	85%	18%
Leticia	82	14.5	28	82,4	90%	4%
Manizales	2126	11,3	20	68,0	80%	23%
MedellIn	1475	12.3	28	82,4	70%	19%
Mitu	200	14.4	32	89,6	90%	7%
Mocoa	605	13.4	30	86,0	90%	11%
Monteria	49	14.6	34	93,2	80%	6%
Neiva	442	14.0	34	93,2	70%	10%
Pasto	2559	10.8	25	77,0	80%	28%
Pereira	1415	12.4	30	86,0	80%	19%
Popayán	1738	11.9	25	77,0	80%	21%
Puerto Carreño	51	14.6	30	86,0	70%	4%
Quibdó	32	14.6	31	87,8	90%	5%
Riohacha	47	14.6	34	93,2	80%	6%
Rionegro	2125	11,34	24	75,2	80%	24%
San Andres Islas	20	14.7	33	91,4	90%	6%
Santa Marta	2	14.7	34	93,2	90%	6%
Sincelejo	200	14.4	33	91,4	90%	8%
Tunja	2775	10.5	18	64,4	75%	28%
Valledupar	175	14.4	35	95,0	80%	8%
Villavicencio	467	13,9	31	87,8	80%	10%
Yopal	350	14,1	32	89,6	90%	9%

Fuente : IDEAM 2010

NOTAS:

¹ Temperatura máxima promedio

² scfm = cfm FAD X (1 - Pérdidas)

³ Condiciones estándar:

Temperatura ambiente : 68°F

Presión atmosférica: 14,5 psi (o metros sobre el nivel del mar)

Humedad relativa: 0%

Fuente: (IDEAM, 2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 11 Consumos de aire nominales del proceso.

PLANTA 0				
No. Cuarto	Cuarto	Tomas Aire Comp.	Caudal por punto (scfm)	Caudal Total (scfm)
1	Almacén	2	8,48	16,95
6	Alm. Prod. Químicos	1	8,48	8,48
2	Gomas	1	8,48	8,48
3	Neumáticos	1	10,00	10
9	Catenaria	1	8,48	8,48
12	Taller Eléctrico	1	8,48	8,48
11	Taller Mecánico	1	14,00	14
15	Sala Técnica Maq. Lavado	1	8,48	8,48
22	Pinturas	1	11,00	11
21	Reparación Poliéster	1	8,48	8,48
	Vías De Revisión	24	14,00	336
	Resto De Planta	16	8,48	135,68
PLANTA 1				
24	Almacén	1	8,48	8,48
26	Sala Compresores	1	8,48	8,48
PLANTA 2				
	Taller Mecánico	2	8,48	16,96
TOTAL NOMINAL DE AIRE REQUERIDO POR EL PROCESO (scfm)				608,43

Fuente: Propia.

Una vez se tiene el consumo nominal de placa, se debe tener en cuenta el porcentaje de utilización de la herramienta y el factor de simultaneidad de los equipos. De igual forma después de obtener el caudal real se deben tener en cuenta los factores de seguridad, porcentaje de fugas, ampliaciones futuras y errores de cálculo posibles. Generalmente este crecimiento se proyecta entre 2 y 3 años, en ocasiones particulares se exige contemplar entre 5 y 10 años por dicho concepto.

Según este caudal de 188 scfm se debe corregir según las condiciones ambientales para Medellín y así poder obtener el caudal de aire FAD que nos permitirá seleccionar el compresor adecuado para el proceso.

$$ACFM = SCFM * \left(\frac{P_{std}}{P_{act} - P_{sat} * \phi} \right) * \left(\frac{T_{act}}{T_{std}} \right)$$

Con esta fórmula podemos convertir el caudal nominal a ft³/min

Donde:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 12 Cálculo de caudal de aire requerido total.

PUNTOS DE CONSUMO Y CAUDAL REQUERIDO POR CADA PUNTO DE SERVICIO											
PLANTA 0			Caudal por punto (scfm)	Caudal Total	Utilización (%)	Factor de Ocurrencia o Simultaneidad	TOLERANCIAS PERMITIDAS			Factor de Crecimiento a 10 AÑOS	Total Caudal Requerido (scfm)
No. Cuarto	Cuarto	Tomas Aire Comp.					Por Fugas	Error de Cálculo	Como Reserva		
1	Almacén	2	8,48	16,95	25%	0,25	110%	115%	120%	150%	2
6	Alm. Prod. Químicos	1	8,48	8,48	30%	1	110%	115%	120%	150%	6
2	Gomas	1	8,48	8,48	30%	1	110%	115%	120%	150%	6
3	Neumáticos	1	10,00	10	50%	1	110%	115%	120%	150%	11
9	Catenaria	1	8,48	8,48	25%	1	110%	115%	120%	150%	5
12	Taller Eléctrico	1	8,48	8,48	25%	1	110%	115%	120%	150%	5
11	Taller Mecánico	1	14,00	14	50%	1	110%	115%	120%	150%	16
15	Sala Técnica Maq. Lavado	1	8,48	8,48	25%	1	110%	115%	120%	150%	5
22	Pinturas	1	11,00	11	30%	1	110%	115%	120%	150%	8
21	Reparación Poliéster	1	8,48	8,48	25%	1	110%	115%	120%	150%	5
	Vías De Revisión	24	14,00	336	25%	0,5	110%	115%	120%	150%	96
	Resto De Planta	16	8,48	135,68	15%	0,3	110%	115%	120%	150%	14
PLANTA 1											
24	Almacén	1	8,48	8,48	25%	1	110%	115%	120%	150%	5
26	Sala Compresores	1	8,48	8,48	15%	1	110%	115%	120%	150%	3
PLANTA 2											
	Taller Mecánico	2	8,48	16,96	25%	0,25	110%	115%	120%	150%	2
TOTAL DE AIRE REQUERIDO (scfm)											188

Fuente: Propia.

ACFM = Actual Cubic Feet per Minute

SCFM = Standard Cubic Feet per Minute

Pstd = standard absolute air pressure (psia)

Pact = absolute pressure at the actual level (psia)

Psat = saturation pressure at the actual temperature (psi)

Φ = Actual relative humidity

Tact = Actual ambient air temperature (°R)

Tstd = Standard temperature (°R)

$$ACFM = 188 * \left(\frac{14,7}{12,3 - 0,5069 * 0,7} \right) * \left(\frac{542,07}{527,67} \right) = 237,77$$

Otra forma de calcular este valor es aplicar un porcentaje de perdidas recomendado del 19 %, que serían las perdidas por eficiencia en los compresores.

$$ACFM = \frac{188}{0,81} = 232,1$$

Que nos daría un resultado muy similar al anterior.

4.1.3 Definir la Presión de Trabajo en la Estación de Aire

Con los datos de funcionamiento de las herramientas neumáticas a utilizar se puede apreciar que se necesita una presión mínima de trabajo de 6 bares y máxima de 6,2 bares. Para definir ahora la presión de la estación de aire se debe tener en cuenta las caídas de presión generada por el filtro, el sistema de tratamiento de aire y la red de distribución.

4.1.3.1 Presión punto final:

Se comienza partiendo de la presión requerida en punto final.

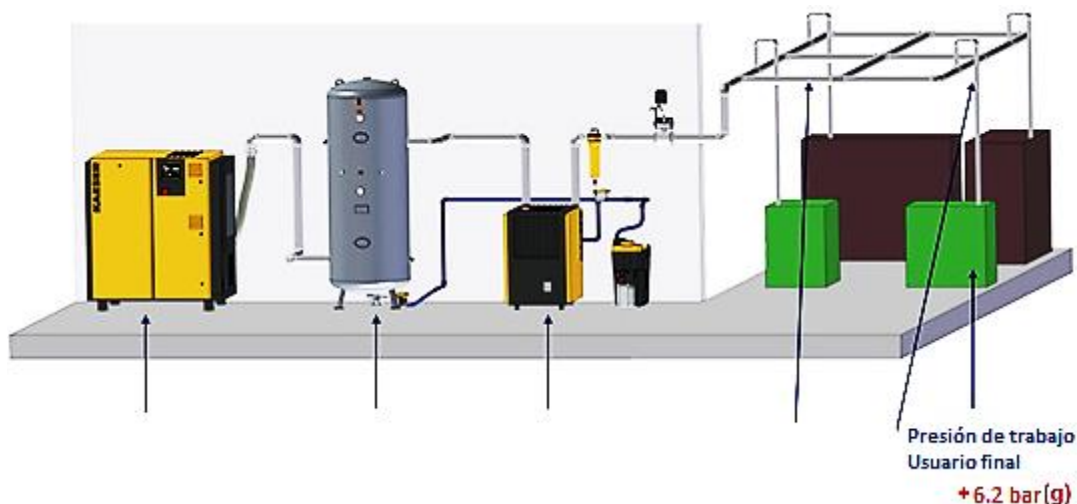


Figura 41 Presión punto final del proceso. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

4.1.3.2 Caída de presión tratamiento de aire:

Para esto se calculan las pérdidas en el cuarto de compresores las cuales están dadas por la tubería del cuarto, tanque pulmón, secador y filtro de línea. A continuación se relaciona algunos datos técnicos suministrados por fabricantes de sistemas de aire comprimido sobre la caída de presión de estos componentes.

Tabla 13 Caída de presión de elementos de tratamiento de aire.

Componente	Δp_{\min} [bar]	Δp_{\max} [bar]
Tubería de distribución de aire	0.1	0.3
Secador refrigerativo	0.2	0.5
Secador desecante, incluyendo prefiltro y filtro de partículas	0.3	1.0
Prefiltro	0.1	0.6
Microfiltro	0.1	0.6
Filtro de carbon activado	0.1	0.3
Adsorción con carbon activado	0.1	0.3
Control maestro (diferencial de conexión)	0.2	3

Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Para el caso de la caída de presión ocasionada por tanque, secador y filtro se obtuvo según datos consultados de los fabricantes lo siguiente:

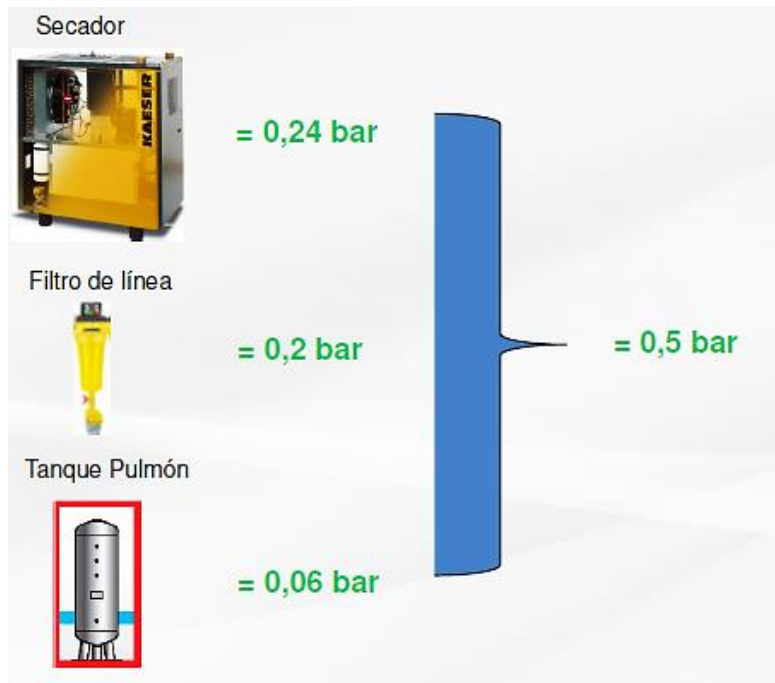


Figura 42 Caída de presión en tanque, secador y filtro de línea. Fuente: Propia.

Según estos datos de caída de presión, estos componentes le suman al sistema una caída de 0.5 bares, como se aprecia en la ilustración.

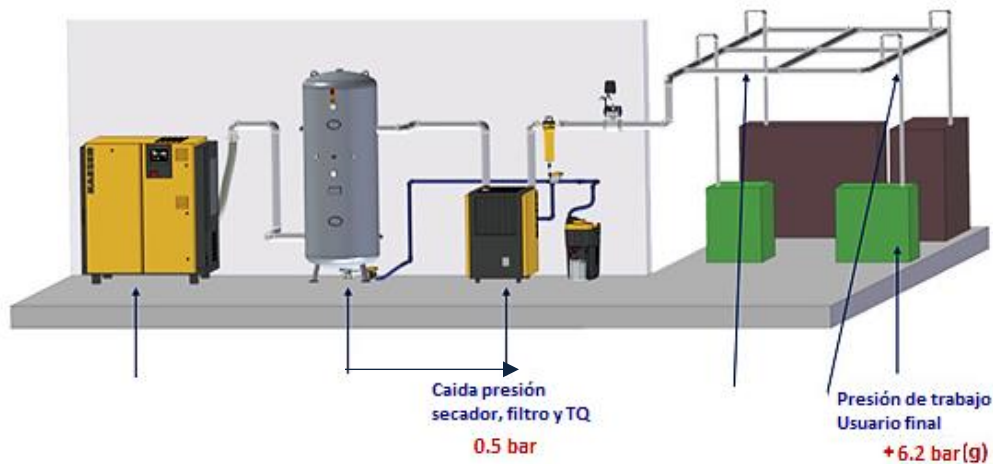


Figura 43 Caída de presión del tratamiento del aire. Fuente: Propia.

4.1.3.3 Caída red cuarto compresores

La red de interconexión del cuarto de compresores no representa una caída alta de presión para el sistema ya que las distancias son muy pequeñas. Se procede a realizar el cálculo manual por medio del monograma.

Para este cálculo se tienen los siguientes datos:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

- Longitud de tubería: 20m
- Caudal de aire: 188 scfm \approx 5.32 m³/min
- Perdida de presión: 0.03 bar \approx 0.4 psi.
- Presión del sistema: 6.5 bar

El diámetro interno de las tuberías de aire comprimido puede calcularse con ayuda del nomograma de la siguiente forma:

- Primero, marque la longitud de las tuberías y el caudal en los ejes A y B.
- Unir ambos puntos con una línea recta, cuya prolongación cortará el eje C en un punto.
- A continuación, marcar en los ejes E y G la presión mínima del sistema y la pérdida máxima de presión deseada.
- La línea recta entre esos dos puntos corta el eje F.
- La recta que une los puntos de corte de los ejes C y F corta el eje D en el punto que indica el diámetro exigido para las tuberías.

Para el dimensionamiento de la red de aire comprimido es importante tener en cuenta las velocidades recomendadas para esta labor, la cual debe estar entre 5 y 10 m/s, aunque para colectores principales y anillos pueden alcanzar velocidades entre 15 y 20 m/s.

$$V_{fluido} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi * r^2}$$

Donde:

- Q: caudal en m³/s
- V: Velocidad en m/s
- A: Sección de la tubería en m²
- r, radio de la tubería en m. De este valor sacaremos el diámetro con $D = 2 * r$

Según el cálculo realizado se obtiene que para una caída de presión de 0.03 bar podemos seleccionar una tubería con diámetro interno de 50mm equivalente a un diámetro comercial de 2".

Donde la velocidad se calcula:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{188 \text{ cfm}}{A} = \frac{0,0887 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0,025^2} = 4,519 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se procede a validar esta caída de presión, con el software transair Flow Calculator, donde se observa que el sistema aproxima una caída de presión mínima de 0.015 bares, una tubería de 63 mm de diámetro, que sería aproximadamente de 2" ½ .

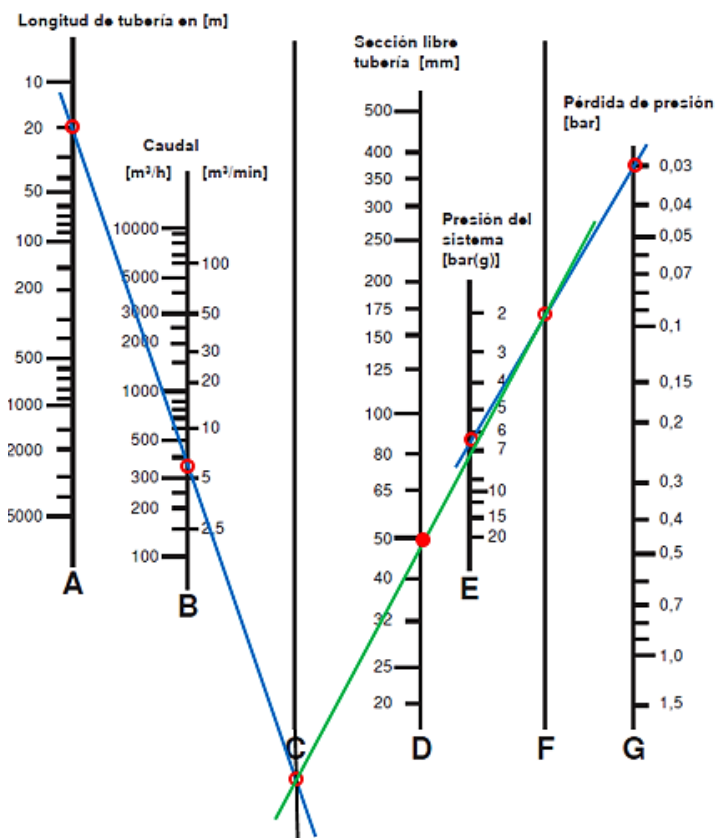


Figura 44 Monograma para determinar el posible diámetro de la tubería. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).

Teniendo en cuenta que por requerimiento del proyecto, se debe obtener la máxima eficiencia, por tal motivo seleccionaremos para el cuarto de compresores una tubería en aluminio Smart pipe de 63 mm, la cual nos permite obtener una menor caída de presión, nos elimina la posibilidad de corrosión y las fugas.

4.1.3.4 Caída de presión de la red principal

Se contemplaron 4 secciones donde se calculó caída de presión para cada sección.

4.1.3.5 Colector de los 3 pisos

Se tiene una presión de 99.9 psi, caudal de 188 scfm y una caída de presión de 0.03 bar en un tramo de tubería de 28 m de longitud en línea recta. Se valida con el software transair Flow Calculator y se observa que el sistema nos selecciona para la caída de presión mínima de 0.01 bar una tubería de 63mm equivalente a un diámetro comercial de 2" ½. Teniendo en cuenta que son condiciones muy similares que el cuarto de compresores para este tramo nos da una caída de presión de 0.01 bar con una velocidad del fluido de 4.2 m/s.

4.1.3.6 Caídas de presión en nivel 0

Se tiene una presión 99.8 psi, caudal de 182 scfm, con una caída de presión de 0.2 bar en un tramo de tubería de 750 m de longitud en anillo.

Transair Flow Calculator

Nombre del proyecto:

Contacto del cliente:

Fecha:

Datos del proyecto

Gas:

Presión: psig

Flujo: Scfm

Distancia: m

Caída de presión máxima: psig o %

Red:

Material Transair:

Resultados del proyecto

Dimensionamiento

Diámetro Transair:

Flujo máximo Transair:

Velocidad del gas:

Caída de presión

Tubo de aluminio Transair: psig

Acero nuevo: psig

Acero corroído: psig

Solicitud de presupuesto

Figura 45 Cálculo caída de presión cuarto de compresores con software transair. Fuente: (PARKER, 2016).

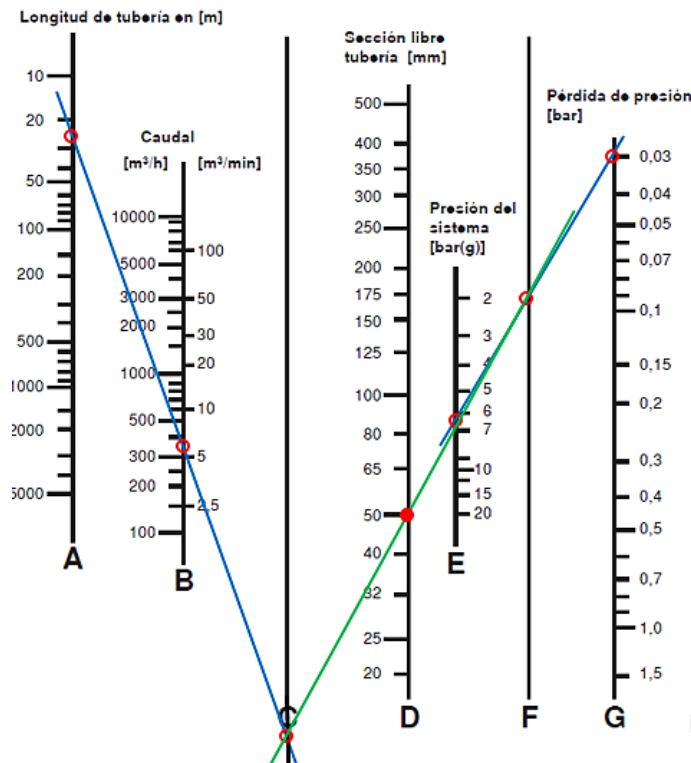


Figura 46 Diámetro de tubería colector. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).

Nombre del proyecto:

Contacto del cliente:

Fecha:

Datos del proyecto

Gas:

Presión: psig

Flujo: Scfm

Distancia: m

Caída de presión máxima: psig o %

Red:

Gama Transair:

Resultados del proyecto

Dimensionamiento

Diámetro Transair:

Flujo máximo Transair:

Velocidad del gas:

Caída de presión

Tubo de aluminio Transair:

Acero nuevo:

Acero corlado:

Figura 47 Caída de presión colector con software transair. Fuente: (PARKER, 2016).

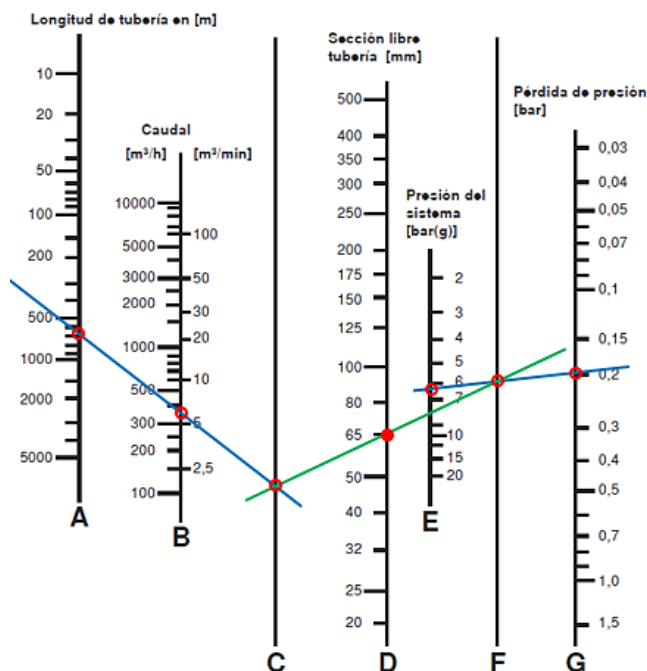


Figura 48 Diámetro de tubería nivel 0. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).

Donde la velocidad se calcula:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{182 \text{ cfm}}{A} = \frac{0,0859 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0,0325^2} = 2,593 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Para este nivel el cálculo manual y el software coinciden, con el diámetro de la tubería, el cual es de 65 mm y el cual sería un diámetro comercial de 2" ½. La velocidad del fluido está por debajo del rango recomendado, lo que nos garantiza una menor caída de presión.



Figura 49 Caída de presión nivel 0 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).

Se logra validar con el software que se alcanza una caída de presión de 0.05 bar y una velocidad del fluido de 2 m/s.

4.1.3.7 Caídas de presión en nivel 1

Se tiene una presión 99.8 psi, caudal de 6 scfm, con una caída de presión de 0.2 bar en un tramo de tubería de 125 m de longitud en línea.

Donde la velocidad se calcula:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{6 \text{ cfm}}{A} = \frac{0.002831685 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0,0125^2} = 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4.1.3.8 Caídas de presión en nivel 2

Se tiene una presión 99.8 psi, caudal de 4 scfm, con una caída de presión de 0.2 bar en un tramo de tubería de 72 m de longitud en línea.

Donde la velocidad se calcula:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4 \text{ cfm}}{A} = \frac{0.00188779 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0,0125^2} = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

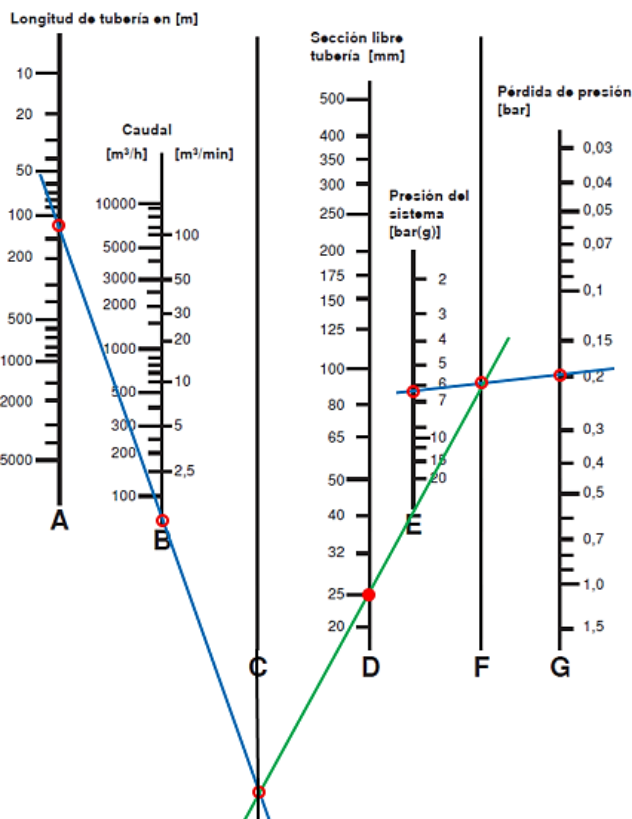


Figura 50 Diámetro de tubería nivel 1. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).

Figura 51 es una captura de pantalla del software Transair. En la parte superior izquierda, se muestran los datos del proyecto: Nombre del proyecto: TRAMVÍA AYACUCHO, Contacto del cliente: FEDERICO MEZCUA, Fecha: AGOSTO 2015. En la parte superior derecha, se muestran los resultados del proyecto: Dimensionamiento: Diámetro Transair: 25 mm, Flujo máximo Transair: 37 Scfm, Velocidad del gas: 1,0 m/s. En la parte inferior izquierda, se muestran los datos de entrada: Gas: Aire comprimido, Presión: 99,8 psig, Flujo: 6 Scfm, Distancia: 125 m, Caída de presión máxima: 2,999999999 psig o 3 %, Red: Línea abierta, Rama Transair: Aluminio. En la parte inferior derecha, se muestran los resultados de la caída de presión: Tubo de aluminio Transair: 0,11 psig, Acero nuevo: 0,15 psig, Acero corrugado: 0,27 psig. Hay un botón de 'Solicitud de presupuesto'.

Figura 51 Caída de presión nivel 1 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).

Para este nivel se seleccionara la tubería Smart pipe de 25 mm la cual se utilizara para los bajantes a cada punto de uso.

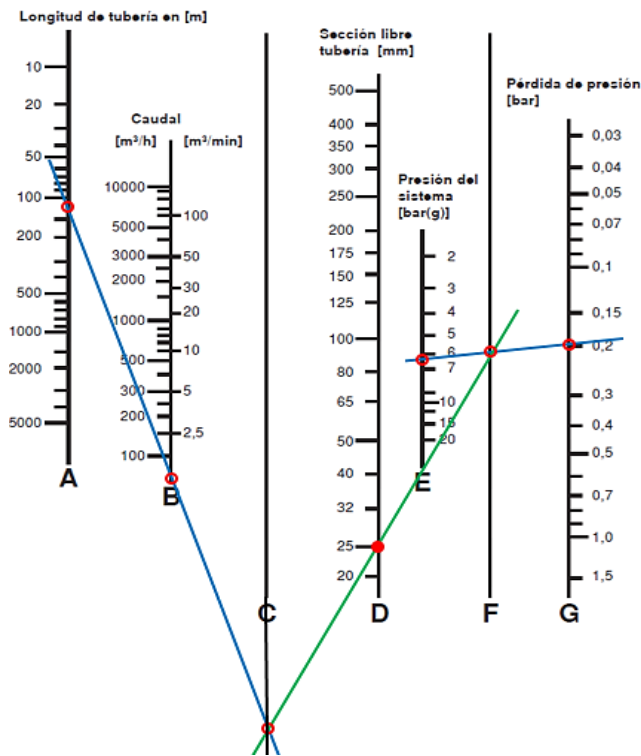


Figura 52 Diámetro tubería nivel 2. Fuente: (PARKER, 2016).

Nombre del proyecto	TRANVÍA AYACUCHO	Resultados del proyecto	
Contacto del cliente	FEDERICO MEZCUA	Dimensionamiento	
Fecha	AGOSTO 2015	Diametro Transair®	25 mm
Datos del proyecto		Flujo máximo Transair®	49 Scfm
Gas	Aire comprimido	Velocidad del gas	0,5 m/s
Presión	99,8 psig	Caída de presión	
Flujo	4 Scfm	Tubo de aluminio Transair®	0,03 psig
Distancia	72 m	Acero nuevo	0,04 psig
Caída de presión máxima	2,9939999999 psig a 3 %	Acero corroído	0,07 psig
Red	Línea abierta	<input type="button" value="Solicitud de presupuesto"/>	
Gama Transair®	Aluminio		

Figura 53 Caída de presión nivel 2 software transair. Fuente: (PARKER, 2016).

Al igual que en el nivel 1 para este nivel 2 se requiere una red de 25 mm Smart pipe la cual nos permite una caída de presión muy baja de 0.005 bar y con una velocidad del fluido de 0.6 m/s.

Con este último análisis se culmina con el cálculo de la caída de presión de la red de aire y se resume en el siguiente cuadro.

Tabla 14 Sumatoria caída de presión red.

SUMATORIA CAIDAS DE PRESIÓN RED DE AIRE [bar]	
Colector	0,01
Nivel # 0	0,05
Nivel # 1	0,01
Nivel # 2	0,005
TOTAL	0,07

Fuente: Propia.

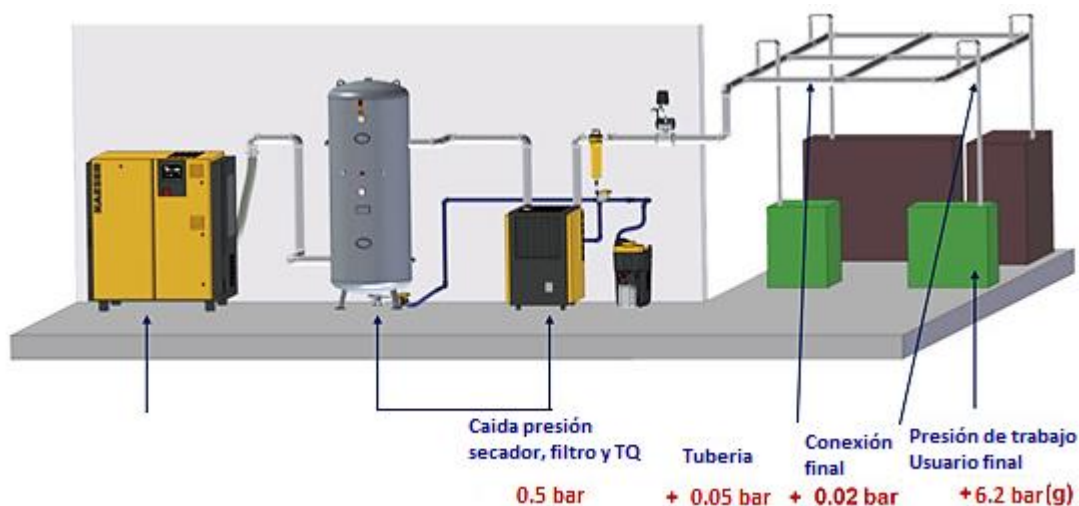


Figura 54 Caída de presión sistema de tratamiento y red de aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Para finalizar el cálculo de la caída de presión final del sistema y determinar la presión de generación del sistema se deben tener en cuenta el diferencial de presión de control y la presión mínima en tanque pulmón.

4.1.3.9 Presión en tanque pulmón (Ptq)

$$P_{tq} = 6,2 + 0,02 + 0,05 + 0,5 = 6,77 \text{ Psi}$$

4.1.3.10 Delta de presión de control

Se recomienda para este tipo de sistema un diferencial no superior a los 0.5 bar, con el fin de que la banda de presión, se mantenga lo más estable posible y así contribuir a la eficiencia de la estación.

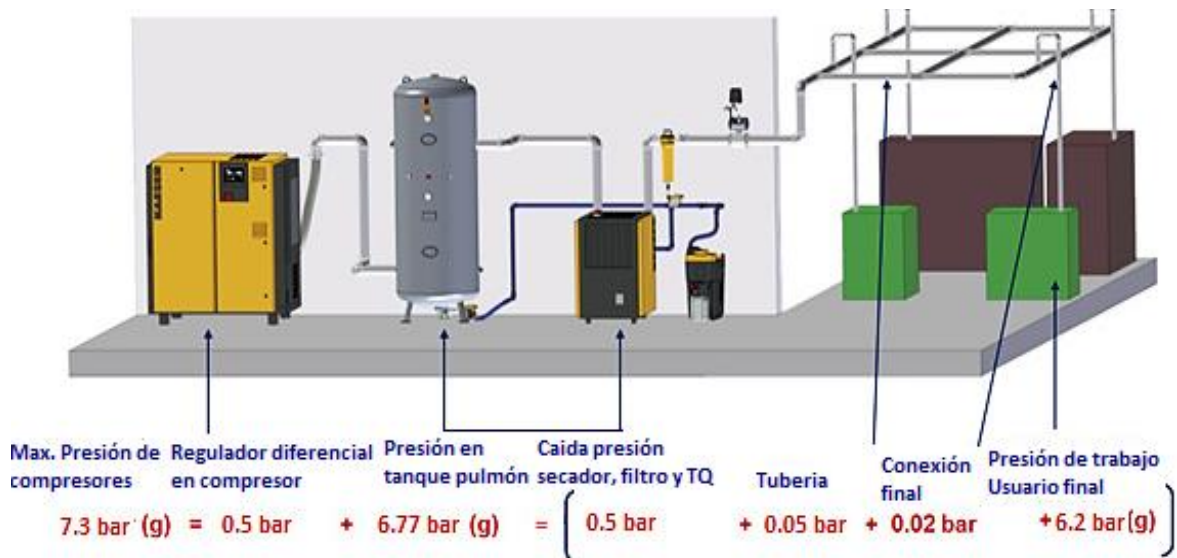


Figura 55 Presión final de estación de aire. Fuente: (Kaeser Compresores de Colombia Ltda., 2012).

Realizando la sumatoria final de las caídas de presión se obtiene la presión final del sistema la cual está definida en 7.3 bares.

Tabla 15 Delta de presión del sistema hasta el punto final de uso.

SUMATORIA CAIDAS DE PRESIÓN DEL SISTEMA [bar]	
Delta de presión de control	0,5
Conexión Cuarto	0,006
Secador	0,240
Filtro	0,200
Tanque	0,060
Colector	0,01
Nivel # 0	0,05
Nivel # 1	0,01
Nivel # 2	0,005
TOTAL	1,1

Fuente: Propia.

4.2 Diseño y Distribución de la Red de Aire Comprimido

Teniendo en cuenta los cálculos realizados, donde se definieron las caídas de presión y el diámetro de la red de aire, se realiza el diseño y distribución de la red de aire de cada una de las plantas del edificio donde estará el taller del tranvía Ayacucho.

Se trabaja en un plano base en AutoCAD suministrado por la empresa Guinovart, desarrolladora del proyecto completo tranvía Ayacucho, el cual tiene toda la distribución de los consumidores de aire del taller.

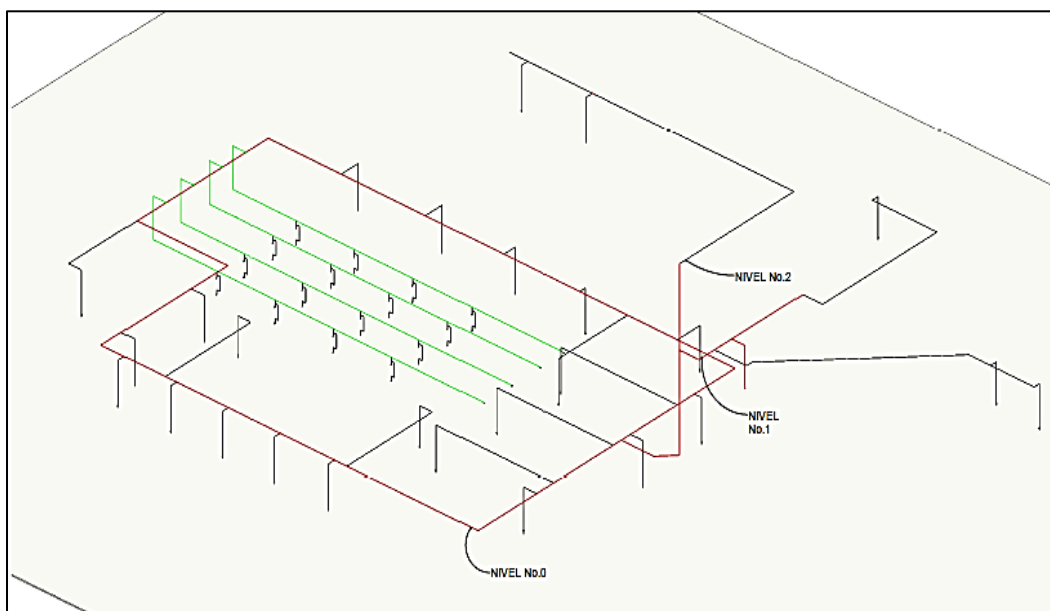


Figura 56 Diseño de la red de aire comprimido en cada nivel del edificio taller tranvía Ayacucho. Fuente: Propia.



Figura 57 Distribución red de aire nivel 1. Fuente: Propia.

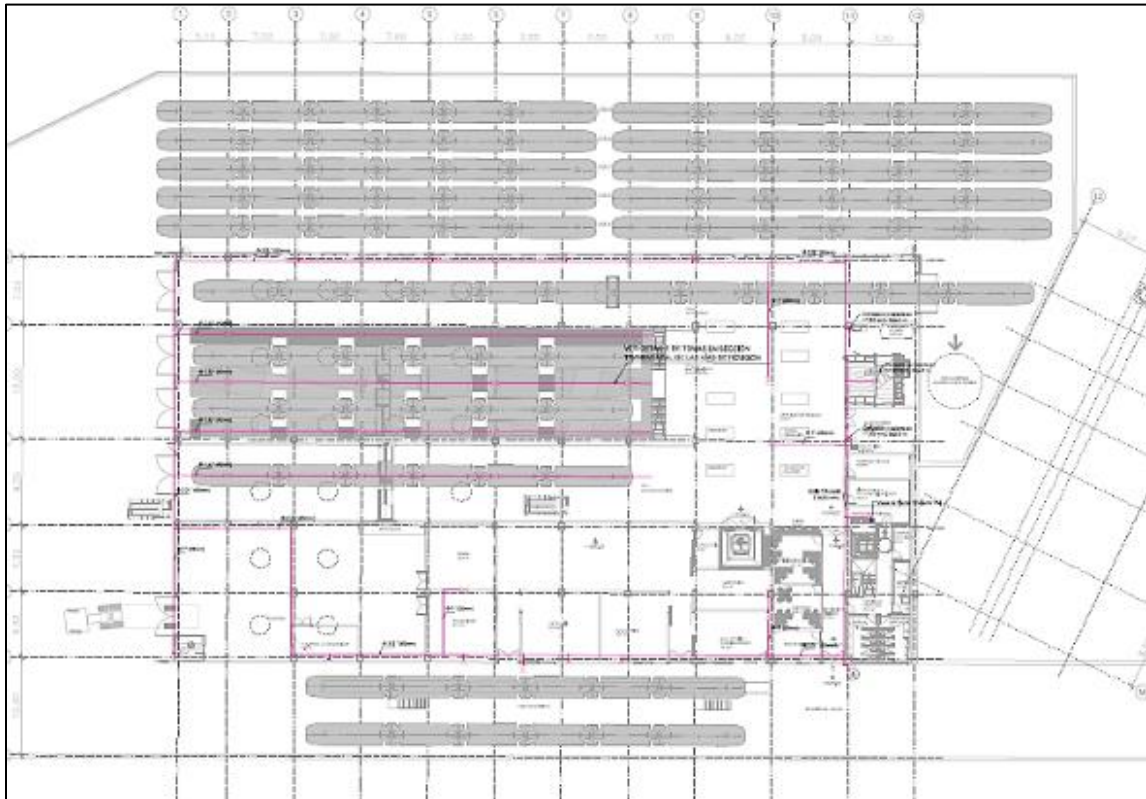


Figura 58 Distribución red de aire nivel 0. Fuente: Propia.



Figura 59 Distribución red de aire nivel 2. Fuente: Propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

4.3 Selección de los Compresores

Como datos de selección del compresor se tendrán en cuenta los datos obtenidos anteriormente con el cálculo del caudal requerido y con la presión de la estación de aire. Adicional se deben tener en cuenta los datos de eficiencia energética de los equipos y el tema ambiental.

Adicional se debe tener en cuenta que el tema de respaldo técnico sea directo del fabricante y con disponibilidad local de tal forma que sea rápida y oportuna.

Datos de selección:

- Caudal de aire: 235 acfm
- Presión del sistema: 7.3 bar

Para ello se evalúan 3 fabricantes de equipos, dentro de los cuales se tiene:

- Kaeser Compresores
- fabricante 1
- fabricante 2.

Se procede a evaluar que equipos de cada uno de estos fabricantes me entrega el aire según los datos mencionados de caudal y presión. Para poder validar esta información nos debemos ir a las fichas técnicas de cada equipo las cuales son emitidas y certificadas por el instituto de aire comprimido y gas en EEUU (CAGI).

- **KAESER COMPRESORES:** Se revisa la información técnica del equipo Kaeser que cumple con los requerimientos del sistema (Datos de selección). Se observa que el equipo que nos cumple, es un compresor de tornillo lubricado BSD 50, el cual tiene la siguiente ficha técnica:
- **FABRICANTE 1:** Se valida información técnica del equipo para el caso de fabricante 1 en la página web de la CAGI. Se observa que el compresor R37IE-A125 no cumple con el requerimiento de caudal de aire:
- **FABRICANTE 2:** Se valida información técnica del equipo para el caso de fabricante 2 en la página web de la CAGI. Se observa que el compresor GA37-125 no cumple con el requerimiento de caudal de aire:

Teniendo en cuenta la información resaltada en las fichas técnicas de cada uno de los equipos evaluados, se realiza un cuadro comparativo donde se analiza punto a punto las diferencias de cada equipo.

Tabla 16 Ficha técnica compresor BSD 50 Kaeser.

KAESER COMPRESSORS		COMPRESSOR DATA SHEET	
		Rotary Compressor: Fixed Speed	
MODEL DATA - FOR COMPRESSED AIR			
1	Manufacturer: Kaeser Compressors, Inc.		
2	Model Number: BSD 50 - 125 psig / 460V/3ph/60Hz	Date:	7/12/2013
	<input checked="" type="checkbox"/> Air-cooled <input type="checkbox"/> Water-cooled	Type:	Screw
	<input checked="" type="checkbox"/> Oil-injected <input type="checkbox"/> Oil-free	# of Stages:	1
3*	Rated Capacity at Full Load Operating Pressure ^{a, e}	236	acfm ^{a, e}
4	Full Load Operating Pressure ^b	115	psig ^b
5	Maximum Full Flow Operating Pressure ^c	125	psig ^c
6	Drive Motor Nominal Rating	50	hp
7	Drive Motor Nominal Efficiency	94.1	percent
8	Fan Motor Nominal Rating (if applicable)	1.3	hp
9	Fan Motor Nominal Efficiency	80	percent
10*	Total Package Input Power at Zero Flow ^e	10.6	kW ^e
11	Total Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^d	42.5	kW ^d
12*	Specific Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^e	18.0	kW/100 cfm ^e

*For models that are tested in the CAGI Performance Verification Program, these items are verified by the third party administrator. Consult CAGI website for a list of participants in the third party verification program: www.cagi.org

Fuente: (Instituto de aire comprimido y gas, 2012).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 17 Ficha técnica fabricante 1

COMPRESSOR DATA SHEET			
Rotary Compressor: Fixed Speed			
MODEL DATA - FOR COMPRESSED AIR			
1	Manufacturer: Ingersoll Rand		
2	Model Number	R3 7IE-A125	Date: October 2012
	<input checked="" type="checkbox"/> Air-cooled <input type="checkbox"/> Water-cooled		Type: Screw
	<input checked="" type="checkbox"/> Oil Injected <input type="checkbox"/> Oil-Free		# of Stages: 1
3*	Rated Capacity at Full Load Operating Pressure ^{a,*}	217	acfm ^{a,*}
4	Full Load Operating Pressure ^b	115	psig ^b
5	Maximum Full Flow Operating Pressure ^c	125	psig ^c
6	Drive Motor Nameplate Rating	50	hp
7	Drive Motor Nameplate Nominal Efficiency	93.0	percent
8	Fan Motor Nameplate Rating (if applicable)	2.0	hp
9	Fan Motor Nameplate Nominal Efficiency	86.5	percent
10*	Total Package Input Power at Zero Flow ^e	16.0	kW ^e
11	Total Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^d	46.8	kW ^d
12*	Specific Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^e	21.57	kW/100 cfm ^e

* For models that are tested in the CAGI Performance Verification Program, these are the items verified by the third party program administrator
Consult CAGI website for a list of participants in the third party verification program: www.cagi.org

Fuente: (Instituto de aire comprimido y gas, 2012).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 18 Ficha técnica fabricante 2

MODEL DATA - FOR COMPRESSED AIR			
1	Manufacturer: Atlas Copco		
2	Model Number: GA37-125 AP	Date:	6/15/2012
	<input checked="" type="checkbox"/> Air-cooled <input type="checkbox"/> Water-cooled	Type:	Screw
	<input checked="" type="checkbox"/> Oil-injected <input type="checkbox"/> Oil-free	# of Stages:	1
3*	Rated Capacity at Full Load Operating Pressure ^{a, e}	229	acfm ^{a, e}
4	Full Load Operating Pressure ^b	125	psig ^b
5	Maximum Full Flow Operating Pressure ^c	132	psig ^c
6	Drive Motor Nominal Rating	50	hp
7	Drive Motor Nominal Efficiency	93.6	percent
8	Fan Motor Nominal Rating (if applicable)	1.3	hp
9	Fan Motor Nominal Efficiency	73.0	percent
10*	Total Package Input Power at Zero Flow ^e	10.8	kW ^e
11	Total Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^d	45.0	kW ^d
12*	Specific Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure ^e	19.7	kW/100 cfm ^e

*For models that are tested in the CAGI Performance Verification Program, these items are verified by the third party administrator. Consult CAGI website for a list of participants in the third party verification program: www.cagi.org

Fuente: (Instituto de aire comprimido y gas, 2012).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 19 Comparativo técnico equipos evaluados.

	COMPARATIVO TECNICO EQUIPOS		
	KAESER BSD 50	FABRICANTE 1 - R37 IE	FABRICANTE 2 - GA 37
Entrega de Aire [acfm]	236	217	229
Presión de trabajo [psig]	125	125	132
Potencia Nominal Motor [Hp]	50	50	50
Potencia de entrada paquete de maquina [kW]	42,5	46,8	45
Potencia específica (Eficiencia) [kW/100cfm]	18	21,57	19,7
Compensación medio ambiente	SI	NO	NO
Representación directa de fabricante en la ciudad	SI	NO	NO
Precio equipo [\$ USD]	\$25.233	\$24.094	\$24.210
Costo Consumo energía anual (210 días/año) [\$ COP]	\$36.864.000	\$44.175.360	\$40.345.600

Fuente: Propia.

En el anterior cuadro aparecen algunos valores en verde, los cuales representan puntos a favor para la selección del equipo, donde se observan grandes ventajas del compresor BSD 50 en comparación con los otros. Por ejemplo la entrega de aire, la potencia de entrada, potencia específica, impacto ambiental generado, debido que posee un certificado de compensación de huella de carbono el cual indica que se están compensando las emisiones de CO2 correspondientes a su consumo de energía.

Por otra parte el fabricante del equipo BSD 50 tiene representación directa de casa matriz. Finalmente es muy importante el tema de consumo de energía, el cual se calculó matemáticamente y a través del software KESS propiedad de Kaeser Compresores.

A continuación se detallan tanto los cálculos manuales, como las simulaciones para cada uno de los equipos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 20 Calculo manual costo energético equipos evaluados.

EVALUACIÓN DE COSTO CONSUMO ENERGETICO ANUAL EQUIPOS EVALUADOS				
	DESCRIPCION VARIABLE	ENTRADA	FORMULA	CALCULO
KAESER	Potencia paquete maquina [kW]	42,5	Costo anual energía= Consumo Prom. Aire * Potencia espec. * Horas ope. Anual * Valor kWh	\$36.864.000
	Potencia especifica [kW/100cfm]	18		
	Horas anuales [h/año]	5000		
	Costo energia [\$ /kW*h]	320		
	Consumo de aire promedio	128		
FABRICANTE 1	Potencia paquete maquina [kW]	46,8	Costo anual energía= Consumo Prom. Aire * Potencia espec. * Horas ope. Anual * Valor kWh	\$44.175.360
	Potencia especifica [kW/100cfm]	21,57		
	Horas anuales [h/año]	5000		
	Costo energia [\$ /kW*h]	320		
	Consumo de aire promedio	128		
FABRICANTE 2	Potencia paquete maquina [kW]	45	Costo anual energía= Consumo Prom. Aire * Potencia espec. * Horas ope. Anual * Valor kWh	\$40.345.600
	Potencia especifica [kW/100cfm]	19,7		
	Horas anuales [h/año]	5000		
	Costo energia [\$ /kW*h]	320		
	Consumo de aire promedio	128		

Fuente: Propia.

Tabla 21 . Simulación consumo energía compresor Kaeser BSD 50.

Análisis KESS:		KAESER	
Datos Generales			
Sistemas considerados:	3		
Datos originales basados en:	Medición real ADA		
Intervalo del cálculo:	00:00:30		
Periodo Analizado:	22/08/2012 - 28/08/2012		
Días de trabajo al año:	210		
Costos de energía:			
Costos gales por día de trabajo:	320,000 COP \$/kW	Costos gales fin de semana:	320,000 COP \$/kW
Detalles del sistema:			
Nombre sistema:	Kaeser BSD 50		
Número de compresores:	1	Método control:	partición simple
Consumo de aire anual:	31.718.855,00 cf		
Tipo:	FAD:	Potencia total (carga):	Potencia total (vacío):
01: BSD 50 Enfriado por aire:	237,00 cfm	40,40 kW	10,60 kW
total:	237,00 cfm	40,40 kW	
Consumo de potencia max.:	40,15 kW	Ahorros de energía:	- kWh
Consumo de energía:	115.433,52 kWh	Ahorros costos de energía:	- COP \$
Costos de energía:	36.938.725,33 COP \$	Ahorros totales en costos:	- COP \$
Costos totales:	36.938.725,33 COP \$		
Total agua de enfriamiento:	0,00 gl	Potencia especifica:	22,62 kW[100cfm]
Costos totales del agua:	0,00 COP \$	Costo especifico:	1,1646 COP \$/cf

Fuente: (KAESER COMPRESORES).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 22 Simulación consumo energía compresor Fabricante 1 - R37IE.

Análisis KESS:		KAESER	
Nombre sistema: Fabricante 1 - R37IE			
Número de compresores: 1		Método control: partición simple	
Consumo de aire anual: 31.690.421,25 cf			
Tipo:	FAD:	Potencia total (carga):	Potencia total (vacío):
01: SSPXFE50_Fritolay Enfriado por aire:	216,00 cfm	44,28 kW	13,00 kW
total:	216,00 cfm	44,28 kW	
Consumo de potencia max.: 44,28 kW	Ahorros de energía:	- kWh	
Consumo de energía: 137.021,24 kWh	Ahorros costos de energía:	- COP \$	
Costos de energía: 43.846.796,05 COP \$	Ahorros totales en costos:	- COP \$	
Costos totales: 43.846.796,05 COP \$			
Total agua de enfriamiento: 0,00 gl	Potencia específica:	26,82 kW[100cfm]	
Costos totales del agua: 0,00 COP \$	Costo específico:	1,3836 COP \$/cf	

Fuente: (KAESER COMPRESORES).

Tabla 23 Simulación consumo energía compresor Fabricante 2 – GA 37.

Nombre sistema: Fabricante 2 - GA 37			
Número de compresores: 1		Método control: partición simple	
Consumo de aire anual: 31.696.806,00 cf			
Tipo:	FAD:	Potencia total (carga):	Potencia total (vacío):
01: GA 37 Enfriado por aire:	220,00 cfm	44,70 kW	11,50 kW
total:	220,00 cfm	44,70 kW	
Consumo de potencia max.: 41,42 kW	Ahorros de energía:	- kWh	
Consumo de energía: 125.077,00 kWh	Ahorros costos de energía:	- COP \$	
Costos de energía: 40.024.639,52 COP \$	Ahorros totales en costos:	- COP \$	
Costos totales: 40.024.639,52 COP \$			
Total agua de enfriamiento: 0,00 gl	Potencia específica:	24,51 kW[100cfm]	
Costos totales del agua: 0,00 COP \$	Costo específico:	1,2627 COP \$/cf	

Fuente: (KAESER COMPRESORES).

Se describe a continuación la gráfica de consumo a través de la cual se realizó la simulación, así como su grafica de costos energéticos.

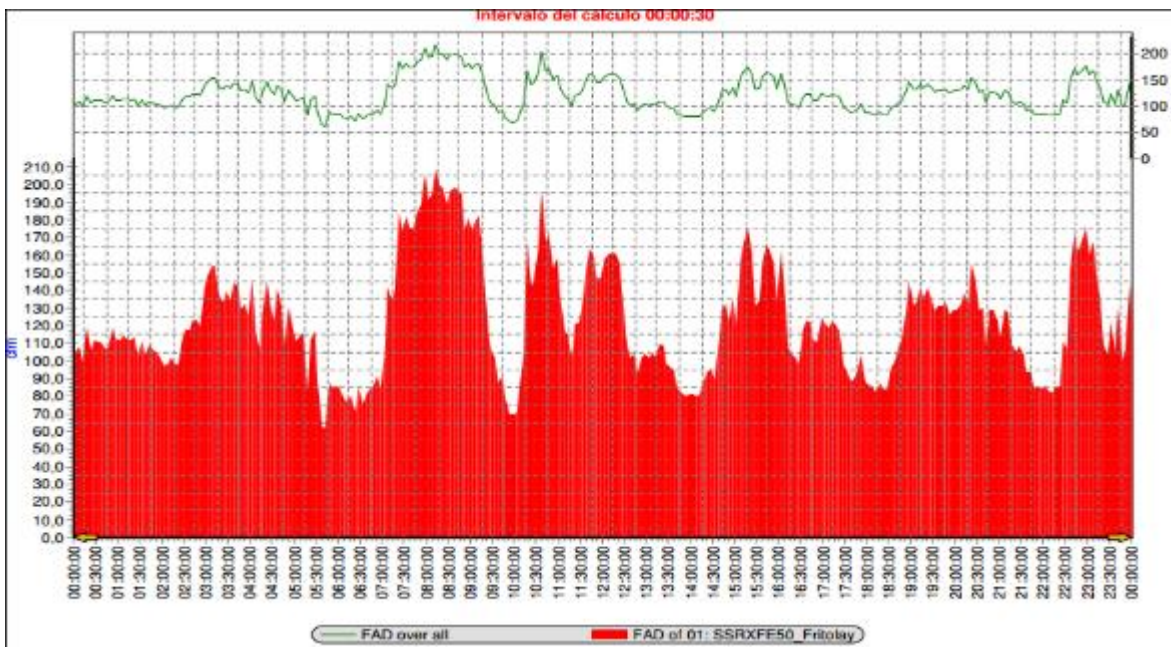


Figura 60 Perfil de consumo de la simulación. Fuente: (KAESER COMPRESORES).

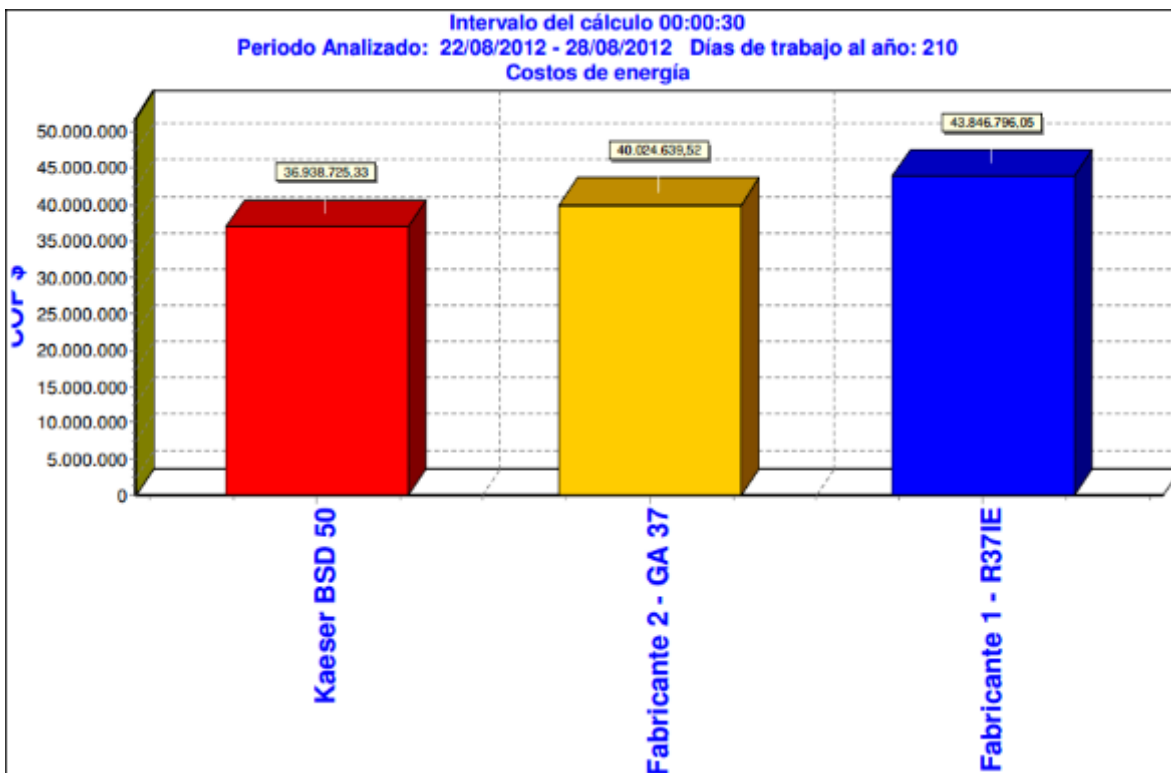


Figura 61 Costos energéticos de los compresores evaluados. Fuente: (KAESER COMPRESORES).

Teniendo en cuenta los datos técnicos evaluados anteriormente en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y el análisis **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el equipo a seleccionar es un compresor Kaeser BSD 50.

4.4 Selección del secador y el tratamiento del aire

Teniendo en cuenta que el compresor elegido fue el equipo Kaeser BSD 50, todo el tratamiento se seleccionara de la misma marca con el fin de mantener la compatibilidad del sistema y garantizar la eficiencia propuesta y facilidad de que el usuario final pueda tener un solo proveedor.

4.4.1 Selección del secador

Para la selección del secador refrigerativo se debe tener en cuenta el caudal de aire máximo a tratar, la presión de trabajo y las condiciones ambientales.

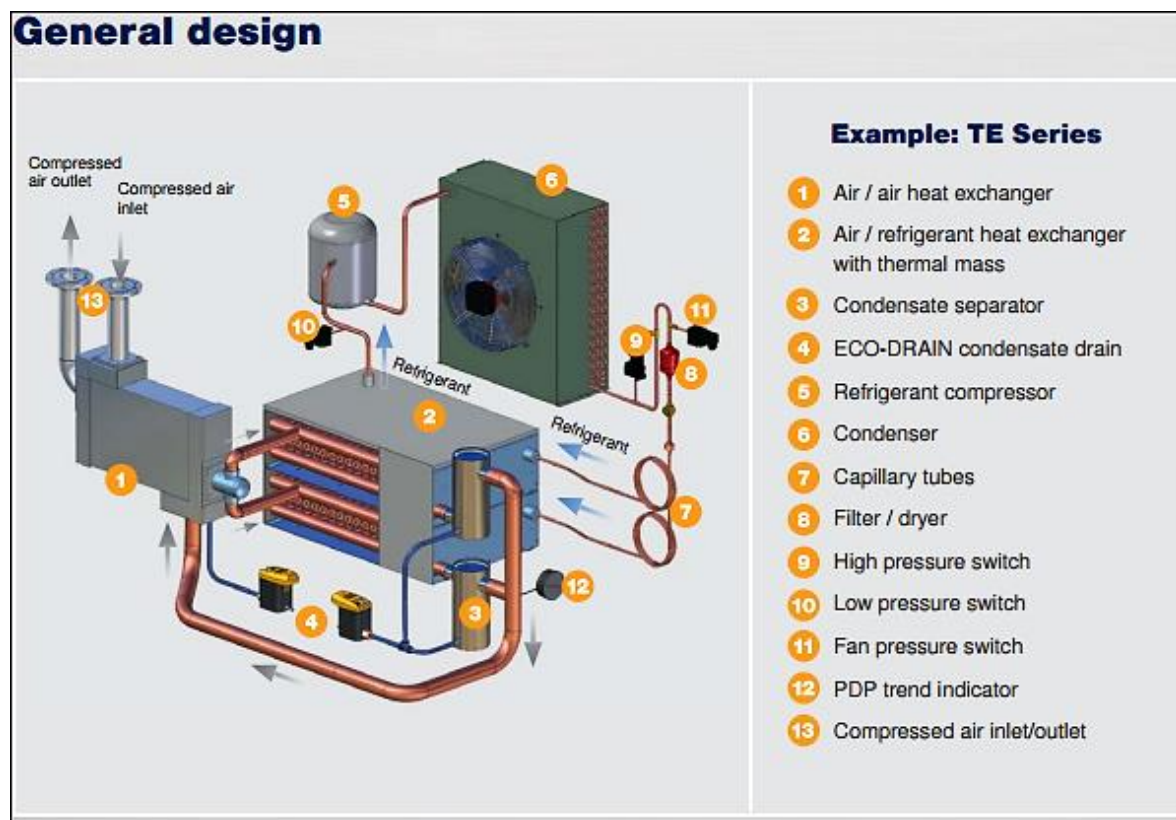


Figura 62 Secador refrigerativo Secotec. Fuente: (KAESER COMPRESORES).

Tabla 24 Factores de corrección por condiciones de operación.

Correction factors for deviating operating conditions (flow rates in m ³ /min x k...)															
Deviating working pressure p at dryer inlet															
Model	p bar (g)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
TA-TF	k _p	0.75	0.84	0.90	0.95	1.00	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.17	1.19	1.21	1.23
Compressed air inlet temperature T _i								Ambient temperature T _a							
Model	T _i (°C)	30	35	40	45	50	55	Model	T _a (°C)	25	30	35	40	43	
TA-TF	k _{Ti}	1.20	1.00	0.83	0.72	0.60	0.49	TA-TF	k _{Ta}	1.00	0.99	0.97	0.94	0.92	
Calculation of flow rate under deviating conditions: Example: Working pressure: 10 bar (g) > Table > k _p = 1.10 Compressed air inlet temperature: 40 °C > Table > k _{Ti} = 0.83 Ambient temperature: 30 °C > Table > k _{Ta} = 0.99								Selected refrigeration dryer: TB 19 with 2.1 m ³ /min (V _{Reference}) Max. possible flow rate under operating conditions $V_{max, operation} = V_{Reference} \times k_p \times k_{Ti} \times k_{Ta}$ $V_{max, operation} = 2.1 \text{ m}^3/\text{min} \times 1.1 \times 0.83 \times 0.99 = 1.9 \text{ m}^3/\text{min}$							

Fuente: (KAESER COMPRESORES).

Tabla 25 Factores de corrección para el taller tranvía Ayacucho.

FORMULACIÓN SELECCIÓN SECADOR Y COEFICIENTES DE VARIABLES		
(Caudal secador) Q _{sec} =	Q Max.Serv. / (k _p *k _{Te} *k _{Ta})	
k _p	Factor de Presión para 100 psi o 7 bar	1
k _{Te}	Factor de temperatura entrada de aire a 38°C	1
k _{Ta}	Factor de temperatura ambiente a 30°C	0,99

Fuente: Propia.

Tabla 26 Calculo secador.

CALCULO SECADOR	
Caudal max. De servicio [acfm]	235
Caudal del secador requerido [acfm] Q _{Sec} = Q Max.Serv. / (k _p *k _{Te} *k _{Ta})	237

Fuente: Propia.

Según los datos obtenidos del secador se procede a buscar en el catálogo de secadores el equipo recomendado, que para este caso es el secador TD 61. Adicional se selecciona un equipo con tecnología Secotec el cual cuenta con una masa térmica que permite conservar el frío en la cámara de secado por un tiempo mayor obteniendo ahorros de energía y apagando la unidad compresora del sistema de refrigeración.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 27 Especificaciones técnicas secadores refrigerativos Secotec.

Technical specifications												
Type *	Volumetric flow rate	Refrigeration dryer pressure loss	Electric power consumption at 100% vol.	Electric power consumption at 50% vol.	Mass	Dimensions W x D x H	Compressed air connection	Condensate drain connection	Electric power supply	Refrigerant mass	Refrigerant mass as CO ₂ equivalent	Hermetic refrigeration circuit as def. F-gases reg.
	m ³ /min	bar	kW	kW	kg	mm	G	G		kg	t	
TA 5	0.60	0.07	0.29	0.16	70	630 x 484 x 779	1/4	1/4	230 V / 1 Ph / 50 Hz	0.27	0.4	•
TA 8	0.85	0.14	0.27	0.15	80					0.22	0.3	•
TA 11	1.25	0.17	0.28	0.15	85					0.36	0.5	•
TB 19	2.10	0.19	0.55	0.30	108	620 x 540 x 963	1	1/4	230 V / 1 Ph / 50 Hz	0.60	0.9	•
TB 26	2.55	0.20	0.62	0.34	116					0.58	0.8	•
TC 31	3.20	0.15	0.75	0.41	155	764 x 660 x 1009	1 1/4	1/4	230 V / 1 Ph / 50 Hz	0.76	1.1	•
TC 36	3.90	0.16	0.88	0.48	170					0.97	1.4	•
TC 44	4.70	0.15	0.89	0.49	200					1.13	1.6	•
TD 51	5.65	0.11	0.86	0.47	251	1125 x 759 x 1187	1 1/2	1/4	400 V / 3 Ph / 50 Hz	1.25	1.8	•
TD 61	7.00	0.15	1.10	0.61	251					1.28	1.8	•
TD 76	8.25	0.17	1.40	0.77	287					1.50	2.1	•
TE 91	10.15	0.15	1.15	0.63	570	1520 x 1060 x				1.90	2.7	•

Fuente: (KAESER COMPRESORES).

4.4.2 Selección filtración

Para la selección del filtro tratador de aire y del secador, se deben tener en cuenta las variables de diseño del sistema, tales como caudal y presión del sistema. También es importante identificar el tipo de industria, porque la norma ISO 8573-1 (2010) nos recomienda el tipo de tratamiento a aplicar al sistema con el fin de garantizar la calidad del proceso productivo.

Este tema de calidad de aire lo habíamos revisado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Para el caso del taller tranvía Ayacucho se debe garantizar la calidad de aire desde la generación, para el proceso más crítico que es el de pintura, por tal motivo encaja con la exigencia 1.4.1 donde se lee de la siguiente forma:

- **El primer dígito (1):** Indica la filtración en partículas y el número 1 hace referencia a que me permite una retención \leq a 20.000 partículas de tamaños entre 0.1 y 0.5 μ .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

- **El segundo dígito (4):** Hace referencia al tratamiento del aire en cuanto a humedad y relacionado al punto de rocío donde el número 3 indica que el aire y su vapor de agua están sometidos a un punto de rocío \leq a 3°C
- **El tercer dígito (1):** Hace referencia a el tratamiento relacionado al contenido de residuo de aceite del aire comprimido, donde el número 1 indica que permite el paso \leq a 0.01mg/m³ de vapores y residuos de aceite.

Para obtener esta calidad de aire la alcanzamos de la siguiente forma:

- Para el tratamiento de partículas (primer dígito) y el tratamiento de residuo y/o vapores de aceite (tercer dígito) se puede solucionar con un filtro KE con un elemento filtrante para retener partículas y vapores de aceite. Este se debe seleccionar teniendo en cuenta el caudal de aire a tratar que es de 235 acfm y la presión de trabajo que está en los 100 psi (7bares).



Figura 63 Filtro de línea KE para partícula y residuo de aceite. Fuente: (KAESER MEXICO, 2010).

Tabla 28 Factores de corrección por presión.

Cálculo del flujo volumétrico															
Factores de corrección en condiciones operativas diferentes (flujo volumétrico en cfm x k...)															
Presión de trabajo distinta a la entrada del filtro p															
p psi (g)	30	45	60	75	90	100	115	130	145	160	175	190	205	217	232
k _p	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.06	1.12	1.17	1.22	1.27	1.32	1.37	1.41	1.46
Ejemplo:						Filtro elegido F 83 con 290 cfm (V _{referencia})									
Presión de trabajo: 145 psi(g) (ver tabla) k _p = 1.17						Flujo volumétrico máximo en condiciones operativas									
						V _{máx Operativo} = V _{referencia} x k _p									
						V _{máx Operativo} = 290 cfm x 1.17 = 339.3 cfm									

Fuente: (KAESER COMPRESORES, s.f.).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

Tabla 29 Factor de presión para taller tranvía Ayacucho.

FORMUALCIÓN SELECCIÓN FILTRO Y COEFICIENTES DE VARIABLES		
(Caudal secador) Q.Filtro=	Q Max.Serv. / (kp)	
kp	Factor de Presión para 100 psi o 7 bar	1

Fuente: Propia.

Tabla 30 Calculo filtro.

CALCULO FILTRO	
Caudal del sistema [acfm]	235
Caudal del secador requerido [acfm] Q. filtro= Q Max.Serv. / (kp)	235

Fuente: Propia.

Tabla 31 Condiciones de operación del compresor.

Datos técnicos							
Para los grados de filtración KB/KE/KAKD							
Modelo	Flujo volumétrico	Conexión de aire comprimido (opción)	Presión de trabajo	Temperatura ambiente	Temperatura de entrada aire comprimido	Peso máximo	Alimentación eléctrica ECO-DRAIN
	cfm	G	psi	°C	°C	kg	
F6	21	3/4 (1/2, 3/4)	30 hasta 232	+3 hasta +50	+3 hasta +66	3.3	95...240 VAC ±10% (50...60 Hz) / 100...125 VDC ±10%
F9	32					3.3	
F16	56	1 (3/4)	30 hasta 232	+3 hasta +50	+3 hasta +66	4.0	
F22	78					4.2	
F26	92					4.3	
F46	163	2 (1 1/2, 1 3/4)	30 hasta 232	+3 hasta +50	+3 hasta +66	8.2	
F83	291					9.1	
F110	388					10.7	
F142	500					11.1	

Datos de rendimiento a 100 psi, referidos a una presión ambiente de 14.5 psi absoluta y 20 °C. En otras condiciones de servicio, el flujo volumétrico variará. Conexiones de aire comprimido G según la norma ISO 228, opcionalmente NPT de acuerdo a la norma ANSI B 1.20.1

Fuente: (KAESER COMPRESORES, s.f.).

Según los datos calculados el filtro requerido en un filtro F83KE, este filtro viene con su respectivo drenaje automático por sensor de nivel que garantiza que cada vez que haya nivel de aceite este sea evacuado inmediatamente del recipiente para garantizar la calidad del aire.

4.5 Selección del tanque pulmón

Para la selección y cálculo del tanque pulmón se deben tener en cuenta las consideraciones realizadas en el capítulo 2.8 Almacenamiento de aire donde se debe tener en cuenta que el tanque es parte fundamental del sistema, ya que este almacena el aire desde la estación y que va a ser

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

suministrado al proceso y como tal debe ser un recipiente que garantice la seguridad, calidad y cantidad de aire requerida en cada momento para el proceso.

Teniendo en cuenta que la humedad está presente en el sistema de aire comprimido y que en algún momento este podría llegar al tanque, se debe seleccionar un tanque galvanizado por dentro y por fuera con la certificación adecuada bajo la normatividad correspondiente ASME americana o (TÜV) europea.



Figura 64 Tanque pulmón galvanizado por dentro y por fuera bajo norma europea TUV. Fuente: (KAESER COMPRESORES, 2016)

Para esta estación de aire el tanque se calculara para la máxima frecuencia permisible de entrada en carga del compresor.

$$V_B = \frac{V^0 * (A - A^2)}{Z * \Delta p}$$

$$V_B = \frac{420 * (0,85 - 0,85^2)}{60 * 0,5} = 1,78 \text{ m}^3$$

Se requiere de un tanque pulmón como mínimo de 2 m³ (2000lt). El tanque debe llevar toda la instrumentación de seguridad (válvula de seguridad, manómetro y drenaje automático). Por otra parte se valida el cálculo del tanque con el software de Kaeser toolbox y los resultados son similares.

Tabla 32 Dimensiones y propiedades del tanque.

Language

English ▾

Sizing Air Receiver

Please use a decimal point and not a comma to indicate the decimal place!
The blue rows indicated contain results!

SI - Units
 US - Units

Calculating as a buffer
 Calculating according to permissible cut-in frequency

FAD of the largest sequenced compressor*	V_1	7	m ³ /min
Required peak load flow rate	V_2	9.95	m ³ /min
Cut-out pressure	P_{max}	7	bar
Cut-in pressure	P_{min}	6.5	bar
Permissible cut-in-frequency**	Z	60	1/h
Utilization factor***	A	0.5	%
$V_2 : V_1$		0.85	
Receiver volume	V_R	1.79	m ³

* This is usually the peak load compressor in multiple compressor installations but the calculation can also apply to base load machines. In general, the larger the air receiver, the better and smoother the compressor station runs.

** Maximum permissible cut-in-frequency per hour of the largest switching compressor. Guide figures: Compressors up to 18.5 kW Z=120, up to 75 kW Z=80, over 75 kW Z=60

*** Cut-off case: Compressors must switch most frequently when they are run at 50% duty cycle (utilization)
Utilization factor $A = (V_2/V_1) = 0.5$

Fuente: (KAESER COMPRESORES, s.f.).

5.RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto se lograron obtener los siguientes resultados:

- Se obtiene los datos del caudal de aire a través de los cálculos realizados, con el caudal de aire nominal de los usuarios según **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, factor de utilización, los factores simultaneidad, factor de crecimiento futuro, porcentaje de pérdidas relacionadas a fugas para lo cual nos dio un total de consumo de aire del taller de 188 scfm según **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.
- Se define la presión de trabajo del sistema la cual queda en 7.3 bares, como presión máxima o de operación 7 bares. Para llegar a este valor se consideran las pérdidas de presión en cada uno de los niveles por longitud de tubería y accesorios, así mismo se contempló las perdidas por tratamiento de aire. La presión al final del proceso es de 6 a 6.2 bar por lo que con esta configuración de presión de 7.3 en la estación de aire nos permite suministrar el aire adecuado para la correcta operación de los equipos.

Tabla 33 Sumatoria de caídas de presión.

SUMATORIA CAIDAS DE PRESIÓN DEL SISTEMA [bar]	
Delta de presión de control	0,5
Conexión Cuarto	0,006
Secador	0,240
Filtro	0,200
Tanque	0,060
Colector	0,01
Nivel # 0	0,05
Nivel # 1	0,01
Nivel # 2	0,005
TOTAL	1,1

Fuente: Propia.

- Se obtiene el diseño de la red de aire principal y del cuarto de compresores, los cuales deben tener los siguientes diámetros 63 y 25 mm, para la distribución final en el punto de consumo, las cuales quedaron plasmadas en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

- Se realiza la selección del compresor de tornillo lubricado, teniendo en cuenta la entrega efectiva de aire, la presión de trabajo, la potencia de paquete de máquina y finalmente la potencia específica. Se realiza el cálculo de consumo energético donde finalmente se obtiene que el compresor Kaeser BSD 50 tiene un consumo energético entre el 8 y 17%, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- Se obtuvieron los cálculos del tratamiento de aire adecuado, según el proceso productivo regido por la norma ISO 8573-1 (2010) y los datos de cálculo del sistema como caudal de aire a tratar y la presión de trabajo.

Para el caso del secador se selecciona un secador refrigerativo tipo Secotec modelo TD 61 el cual me entrega un aire con punto de rocío \leq a 3°C. Teniendo en cuenta el espacio disponible para el montaje de los equipos se debe tener este secador incorporado al compresor BSD 50. Por otra parte se selecciona el sistema de filtración para un caudal de 235 acfm con el fin de obtener una calidad de aire 1.4.1 por lo cual el filtro que cumple con estas características el F83KE. Para este sistema el requerimiento es que se tenga un sistema completamente igual de respaldo ya que el sistema no puede quedar sin aire porque se afecta el servicio de mantenimiento de los coches y por consiguiente la confiabilidad del servicio.

- Se calcula el tanque pulmón requerido para el proceso el cual nos arroja que el tanque adecuado debe ser de 1.78m³ se debe conseguir el tanque que comercialmente se ajuste al valor más cercano posible, para este caso se selecciona un tanque pulmón de 2000 l 11 bar con su respectiva instrumentación y componentes de seguridad. Este tanque cuenta con manómetro indicador de presión, válvula de seguridad y drenaje automático. Por otra parte el tanque es galvanizado por dentro y por fuera con el fin de evitar corrosión en caso de que llegue humedad, este tanque cuenta con la certificación europea bajo la norma TUV. Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- De igual forma se realiza el P&I y los planos de la estación de aire comprimido.

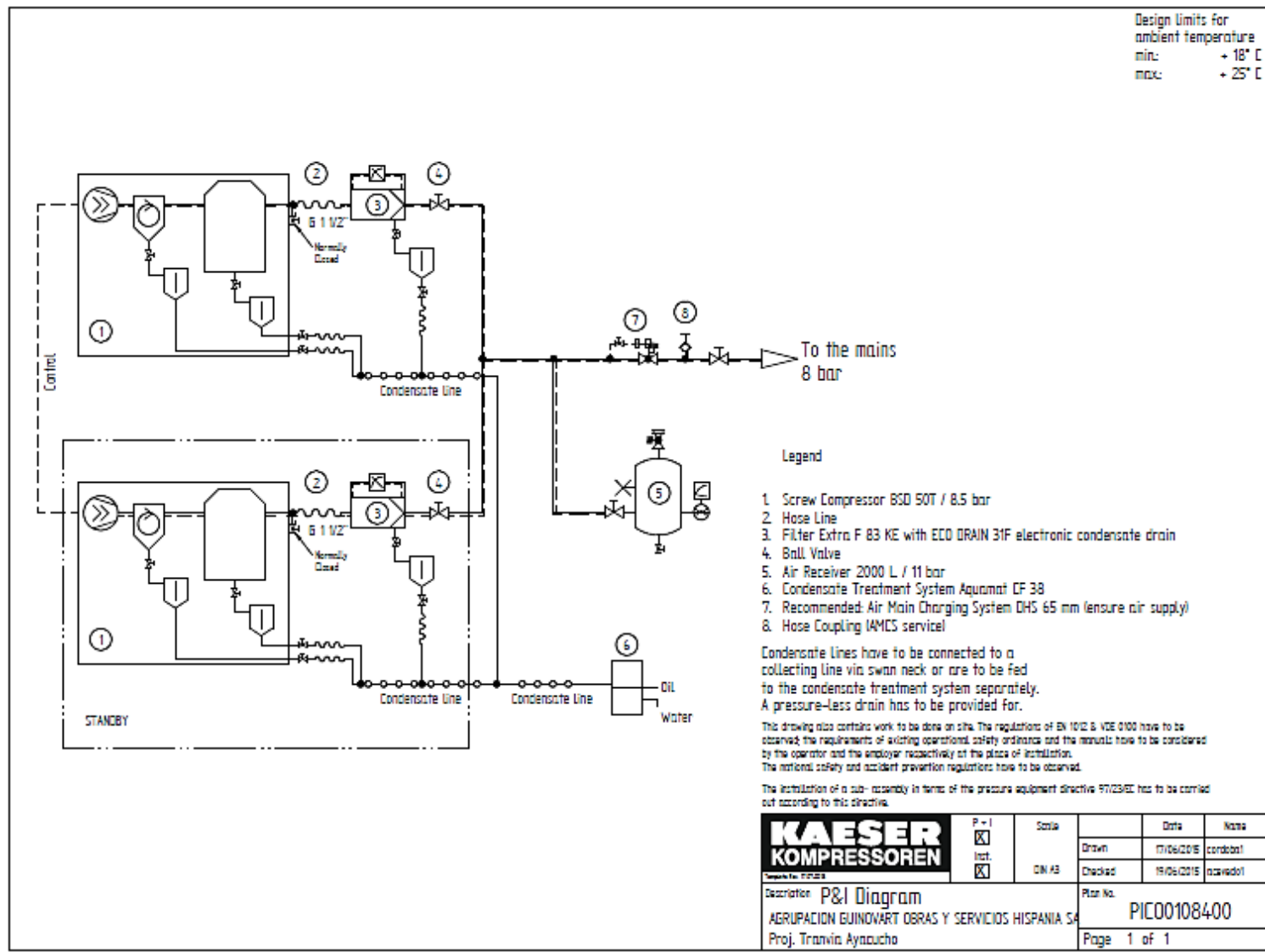


Figura 65 P&I estación de aire. Fuente: Propia.

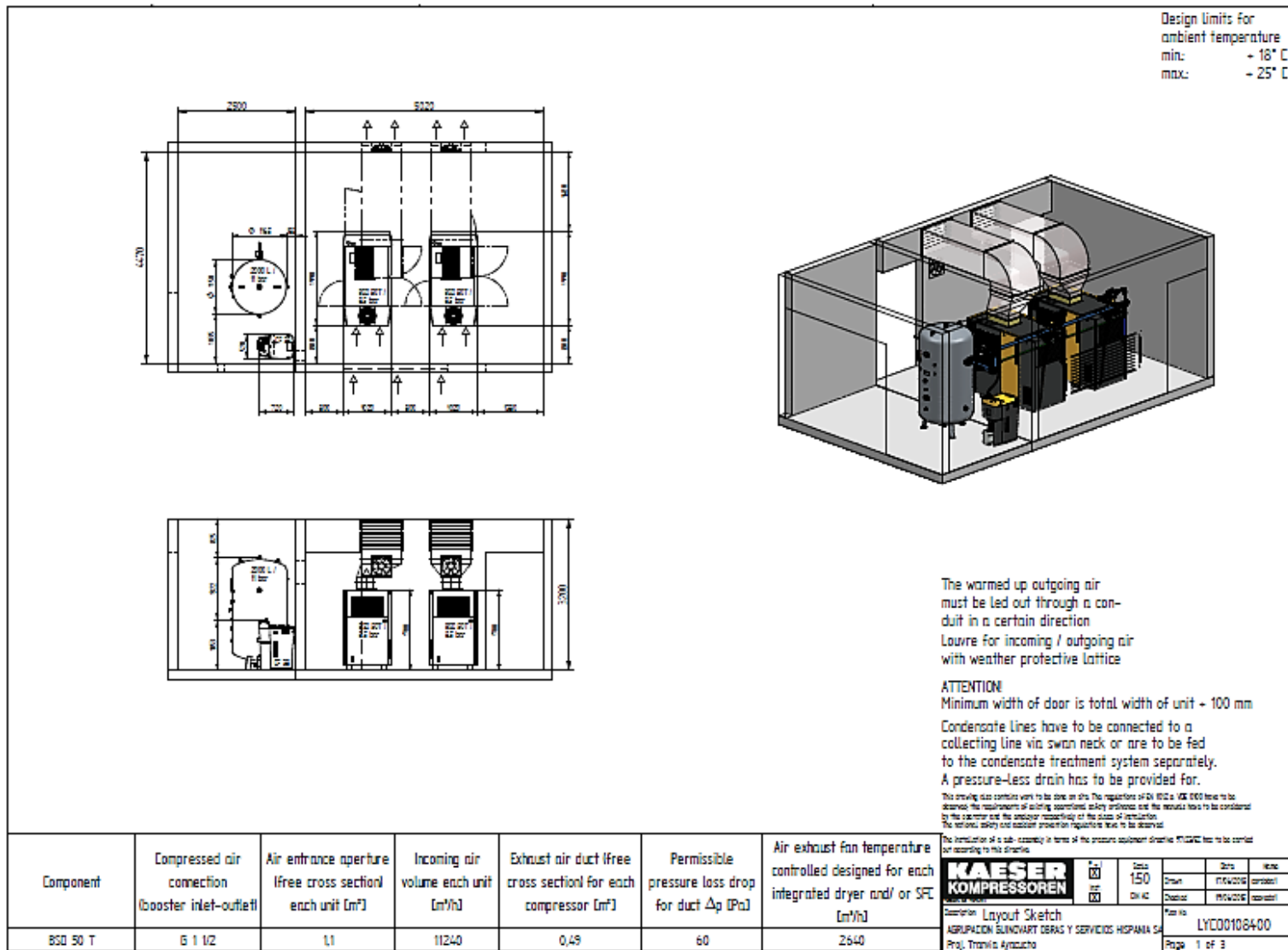


Figura 66 Área recomendada para cuarto de compresores. Fuente: Propia.

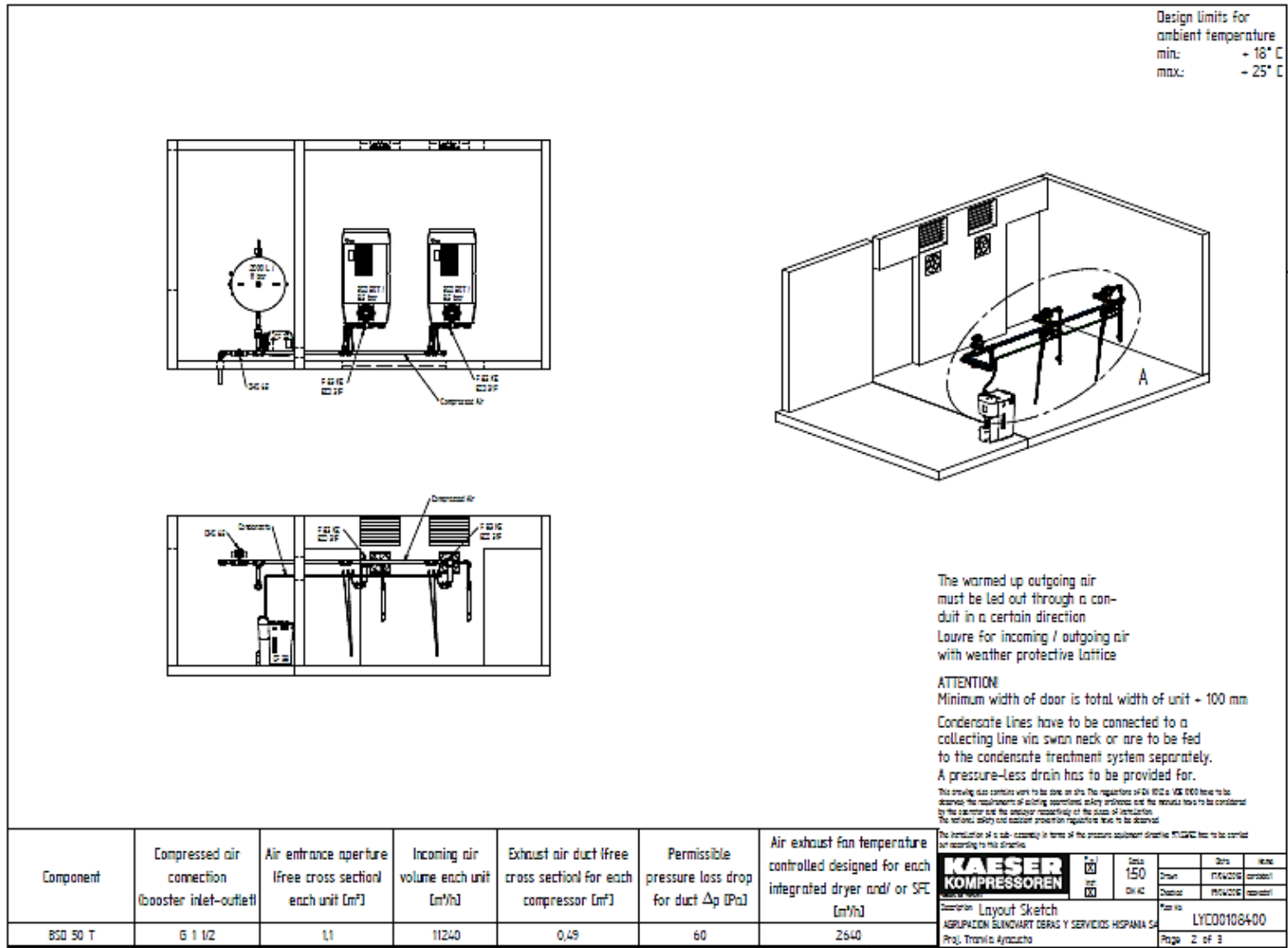


Figura 67 Conexión neumática cuarto de compresores. Fuente: Propia.

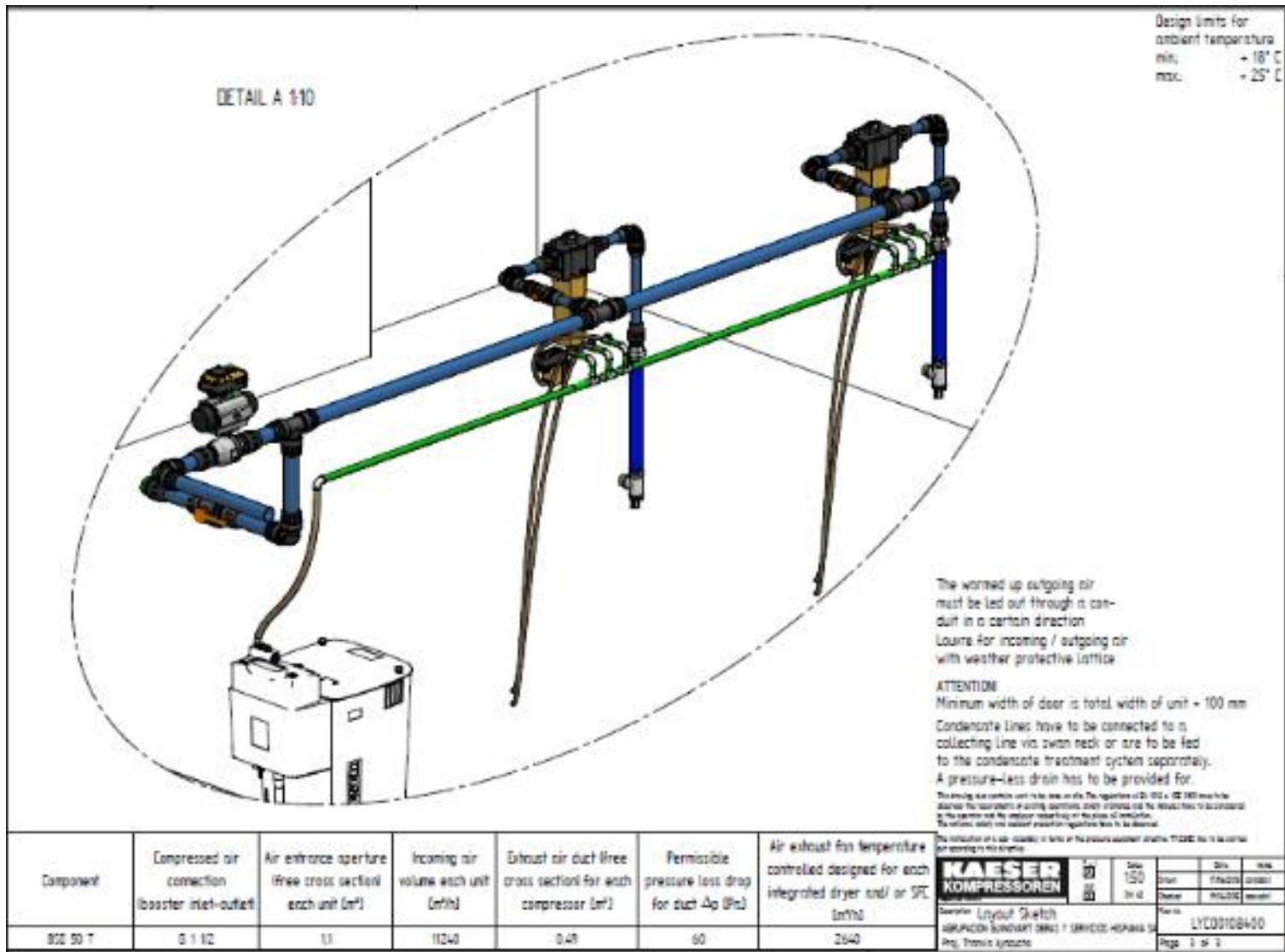


Figura 68 Detalle de conexión Salida de compresores y tratamiento. Fuente: Propia.

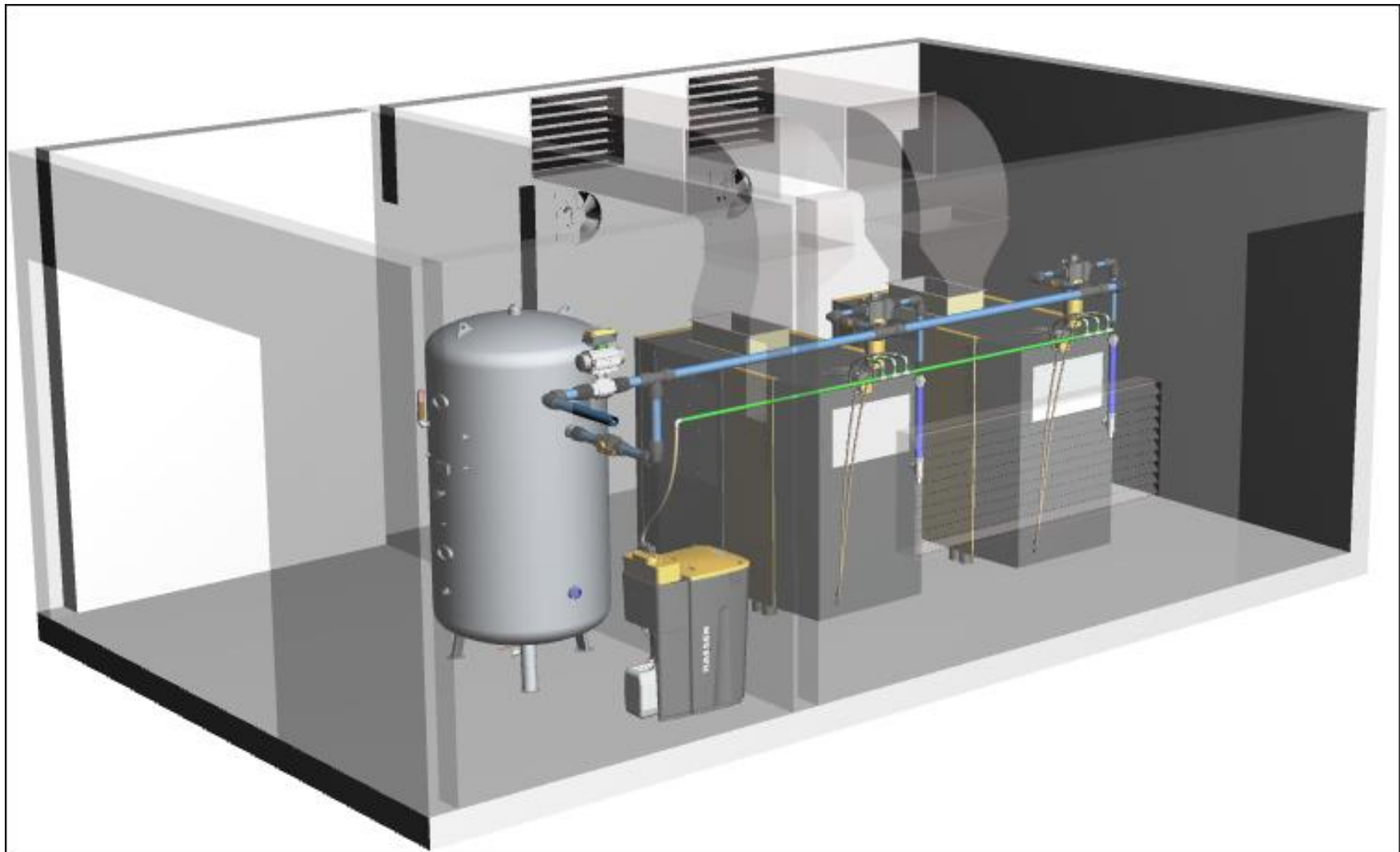



Figura 69 3D del cuarto de compresores. Fuente: Propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-05

6.CONCLUSIONES

- Se realiza diseño del sistema de aire comprimido del taller tranvía Ayacucho, con las dificultades que representaba el no existir precedente en el país otro sistema igual, por lo cual se tomó información de consumo de aire y presión de trabajo de cada uno de los usuarios finales de aire del taller de mtto del tranvía Ayacucho para iniciar dicho diseño. Fue muy importante poder contemplar el consumo de aire de cada uno de los usuarios finales del taller tranvía Ayacucho, con el fin de obtener el consumo total del sistema y con base a esto realizar el diseño de la estación y red de aire comprimido, el cual cumple con los requerimientos de calidad y eficiencia exigidos por el proceso productivo.
- Por medio de los cálculos matemáticos y teniendo en cuenta las distancias de la tubería y perdidas por accesorios, se obtiene el diámetro adecuado de la red, basados en el cálculo de la velocidad del fluido; resultado que además se verifica con el software transair, permitiendo obtener una red de aire para el anillo principal de 2" ½ de diámetro en material de aluminio anodizado con una caída de presión de 0.05 bar y en los bajantes de los usuarios finales una red de aire de 1" de diámetro en material de aluminio anodizado con una caída de presión de 0.02 bar lo que significa menores perdidas de energía en el sistema.
- Después de todos los datos de consumo obtenidos, los cálculos matemáticos de consumo de energía y la simulación realizada en el software Kess, es posible seleccionar el compresor de tornillo Kaeser BSD 50 que entrega la cantidad de aire requerida por el proceso (235 cfm) y la presión requerida por los usuarios finales (7.3psi) , con la calidad de aire exigida por la norma ISO 8573-1(2010). Pero aun así con un componente ambiental y es la reducción entre un 9 y 17% del consumo de energía de equipos de otras marcas.
- Por otra parte este fabricante Kaeser entrega un equipo con CO2 neutro, es decir que la energía anual que consume el compresor (115.433 kW) que emite cerca de 36 ton CO2/año esta compensada a través de un programa ambiental liderado por la empresa CO2 cero y consiste en sembrar en una plantación en el departamento del meta alrededor de 4 árboles por cada tonelada de CO2 emitida al ambiente.
- Se entregan los planos del diseño de la red de aire y distribución en cuarto de compresores, así mismo las memorias de los cálculos del sistema.

REFERENCIAS

Atlas Copco. (20 de 06 de 2011). *sermicomair.com*. Obtenido de *sermicomair.com*:
<http://sermicomair.com/catalogos/archivos12a.pdf>

bibdigital. (s.f.). *Escuela politecnico Nacional*. Obtenido de *bibdigital.epn.edu.ec*:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/>

Cengel, Y. A. (2007). *Mecanica de fluidos*. Mexico: Mc Graw Gil.

CO2CERO. (s.f.). *CO2CERO*. Obtenido de <http://www.co2cero.co/>

Fuster, J. S. (2013). *DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA*. MADRID:
Universidad Pontifica ICAI - ICADE COMILLAS.

GIES, E. (01 de 10 de 2012). <http://www.nytimes.com>. Obtenido de
<http://www.nytimes.com/2012/10/02/business/energy-environment/a-storage-solution-is-in-the-air.html>

IDEAM. (2010). <http://www.ideam.gov.co/>. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/>.

Instituto de aire comprimido y gas. (2012). *CAGI*. Obtenido de CAGI:
<http://www.cagi.org/performance-verification/data-sheets.aspx>

KAESER COMPRESORES. (03 de 2016). <http://ar.kaeser.com>. Obtenido de
<http://ar.kaeser.com: http://ar.kaeser.com/Images/P-755-AR-tcm68-7411.pdf>

Kaeser Compresores de Colombia Ltda. (2012). *Seminario de aire comprimido*.
Coburg.

KAESER COMPRESORES. (s.f.). <http://www.kaeser.com.co/>. Obtenido de
<http://www.kaeser.com.co/: http://www.kaeser.com.co/Images/P-013-CO-tcm33-6741.pdf>

KAESER COMPRESORES. (s.f.). SOFTWARE KESS. COBURG, ALEMANIA.

KAESER COMPRESORES. (s.f.). SOFTWARE TOOLBOX. MEDELLIN.

KAESER COMPRESORES. (s.f.). www.kaeser.com. Obtenido de
http://www.kaeser.com.co/Products_and_Solutions/default.asp

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

KAESER. (s.f.). <http://cl.kaeser.com>. Obtenido de <http://cl.kaeser.com: http://cl.kaeser.com/Images/P-741-CL-tcm54-6774.pdf>

KAESER. (s.f.). <http://dimacoequipos.com>. Obtenido de http://dimacoequipos.com: http://dimacoequipos.com/pdf/catalogo_smart_pipe.pdf

KAESER. (s.f.). <http://www.kaeser.es>. Obtenido de <http://www.kaeser.es: http://www.kaeser.es/Images/P-740-SP-tcm11-6773.pdf>

KAESER. (s.f.). KAESER Kompressoren / www.kaeser.com / Page 23. *SISTEMA DE TUBERÍA*, (pág. 23). BOGOTÁ COLOMBIA.

KAESER MEXICO. (2010). <http://mx.kaeser.com>. Obtenido de <http://mx.kaeser.com: http://mx.kaeser.com/Images/P-2010-MX-tcm57-6752.pdf>

KAESER MEXICO. (s.f.). http://mx.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Air_receiver_sizes. Obtenido de http://mx.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Air_receiver_sizes: http://mx.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Air_receiver_sizes/default.asp

Mundo Compresor. (11 de 07 de 2016). <http://www.mundocompresor.com/>. Obtenido de <http://www.mundocompresor.com: http://www.mundocompresor.com/frontend/mc/Diferentes-Tipos-De-Compresores-vn3776-vst27>

mundocompresor. (19 de julio de 2017). Obtenido de <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/punto-de-rocio>

Paker. (2015). Obtenido de <http://www.oga.com.co/wp-content/uploads/2015/08/ANEXO-1-CALIDAD-DE-AIRE-NORMA-ISO.pdf>

PARKER. (18 de 08 de 2016). *PARKER TRANSAIR*. Obtenido de PARKER TRANSAIR: <http://tools.parkertransair.com/#/TransairFlowCalculator>

Parker. (s.f.). oga. Obtenido de oga: <http://www.oga.com.co/wp-content/uploads/2015/08/ANEXO-1-CALIDAD-DE-AIRE-NORMA-ISO.pdf>

Politecjc. (2017). *Politecnico Jaime Isaza Cadavid*. Obtenido de https://fluidsmechanics.wikispaces.com/Cap_5Evaluaci%C3%B3n+de+p%C3%A9rdidas+de+energ%C3%ADa+debidas+a+la+fricci%C3%B3n+en+tuber%C3%ADas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-07-08

PROPIA. (2015). *CALCULOS INFORME*. MEDELLÍN: ALEXANDER GARCES.

PROPIA. (2015). *COMPARATIVO TECNICO DE EQUIPOS* . MEDELLIN: ALEXANDER GARCES.

PROPIA. (2015). *COSTOS ENERGETICOS DE LOS COMPRESORES DE TORNILLO*. MEDELLIN: ALEXANDER GARCES.

PROPIA. (2015). *PRESENTACIÓN CALUCLOS CAIDAS DE PRESIÓN TRATAMIENTO*.

PROPIA. (s.f.). *PLANOS DE DISTRIBUCIÓN RED DE AIRE*.

PROPIA, A. (2015). *TABLA DE CONSUMOS DE AIRE*.

Propia, A. (2016). *Planos 3D cuarto de compresores*. Medellín.

Reyes, A. D. (2017). Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos73/disminucion-viscocidad-petroleos-disminucion-temperatura/disminucion-viscocidad-petroleos-disminucion-temperatura2.shtml>

sabdifisica. (2017). *sabdifisica*. Obtenido de <https://sabdifisica.wordpress.com/dinamica-de-fluidos/daniel-bernoulli/flujo-laminar/>

sedicom-Ltda. (2017). Obtenido de <http://sedicomp.com/compresores-dinamicos/>

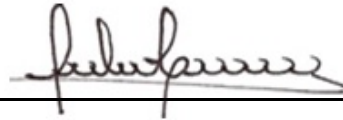
Silvent. (06 de 06 de 2016). <http://www.silvent.com>. Obtenido de <http://www.silvent.com/es/energy-optimization/aire-comprimido-como-forma-de-energia/>

Vaisala. (2013). www.vaisala.com. Obtenido de [www.vaisala.com: http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Dew-point-compressed-air-Application-note-B210991ES-B-LOW.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Dew-point-compressed-air-Application-note-B210991ES-B-LOW.pdf)

wikipedia. (23 de abril de 2017). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Punto_de_roc%C3%ADo

FIRMA ESTUDIANTES: ALEXANDER GARCES ARDILA

FIRMA ASESOR



Se entrega el informe final con las correcciones hechas por el evaluador.

FECHA ENTREGA: 11-08-2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO _____

ACEPTADO _____

ACEPTADO CON
MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: 13-01-2016