

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# **Auditoria de la red de aire comprimido de la planta del Grupo MAPEI**

Mateo Narváez Moreno

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero electromecánico

Asesor

Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica  
Medellín, Colombia  
2024

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

La auditoría de aire comprimido realizada para la compañía Grupo MAPEI tuvo como enfoque primordial el uso racional de la energía; en este caso la suministrada para el óptimo funcionamiento de su compresor. En la industria se tiene como base que de un 100% de energía utilizada en equipos de compresión, solo alrededor de un 50% es aprovechada. Al realizar este trabajo se busca subir ese porcentaje a un 80-90%, haciendo propuestas hacia la mejora como lo son: análisis de consumo a la maquinaria, rediseño y estructuración de una red de aire comprimido, sin pérdidas de presión por tramos innecesarios de tubería, minimizar los desperdicios por fugas de aire en toda la compañía.

Para implementar estos cambios significativos de manera óptima se utilizaron medidores de flujo para el análisis de consumo por maquinaria, software especializado de diseño para el análisis y reestructuración de la red de aire comprimido y medidores de fugas basados en el principio del ultrasonido. Los resultados de este estudio tienen el potencial de llevar a la compañía en un nivel más alto competitivamente, siendo más eficientes energéticamente y ahorrando costos monetarios para ser reinvertidos en mayor crecimiento para la compañía.

*Palabras clave:* Auditoría energética, aire comprimido, pérdidas energéticas, ultrasonido, rediseño.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Me permito agradecer al ITM por reconocer esta modalidad de grado con el fin de culminar el proceso académico que he desempeñado durante estos años, también a la empresa para la cual laboro, llamada SolucionAire s.a.s, porque gracias a ella he podido participar en diversos procesos de auditorías energéticas en aire comprimido, y por supuesto a la empresa Grupo MAPEI por ser sede de este ejercicio de auditoría y facilitar la publicación de dicha información para este fin académico.

Por supuesto también me permito agradecer a mi familia, especialmente a mi esposa Viviana Quintero, por ser siempre fuente de motivación para culminar mi proyecto académico.

## TABLA DE CONTENIDO

---

1. INTRODUCCIÓN .....	7
1.1 Objetivos .....	8
1.1.1 Objetivo general .....	8
1.1.2 Objetivos específicos.....	8
1.2 Organización de este documento .....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 Empresa MAPEI S.A.S. ....	9
2.2 Red de aire comprimido.....	9
2.3 Partes de una red de aire comprimido.....	10
2.3.1 Compresor .....	11
2.3.2 Unidad de mantenimiento neumático .....	13
2.4 Auditorías energéticas.....	16
2.5 Estado del arte .....	17
3. METODOLOGÍA.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1 Elementos de la red de aire comprimido.....	24
4.2 Análisis del consumo energético de la maquinaria.....	31
4.3 Análisis de fugas .....	35
4.4 Oportunidades de mejora y ahorro energético .....	38
4.4.1 Sistema ideal con alternativas de mejora .....	39
4.4.2 Propuesta de protocolo de limpieza y soplado.....	41
4.4.3 Otras posibilidades de ahorro .....	42
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXOS.....	48

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Interior de la planta del grupo MAPEI.....	7
<b>Figura 2.</b> Planta MAPEI de la Estrella, Antioquia.....	9
<b>Figura 3.</b> Estación típica de aire comprimido en la industria.....	10
<b>Figura 4.</b> Compresor Kaeser 10 hp (derecha). Cuarto de compresión en planta MAPEI (Izquierda). .....	11
<b>Figura 5.</b> Partes de un compresor de tornillo .....	12
<b>Figura 6.</b> Tipos de compresores según la carcasa .....	13
<b>Figura 7.</b> Medidores de flujo en línea para medida de SCFM (Vp flow in line). .....	21
<b>Figura 8.</b> Pistola de ultrasonido 100-UP100-S. ....	22
<b>Figura 9.</b> Primer segmento de la red de aire comprimido grupo MAPEI, tramo desde inicio de la planta hasta entrada de cuarto de compresores.....	24
<b>Figura 10.</b> Segundo segmento de la red de aire comprimido grupo MAPEI, tramo desde final de planta hasta entrada de cuarto de compresores.....	25
<b>Figura 11.</b> Tanque húmedo entre compresor y secador (izquierda), Tanque color blanco lateral a entrada cuarto de herramientas (derecha). ....	29
<b>Figura 12.</b> Unidad de Mantenimiento zona de almacenamiento y bodega. ....	30
<b>Figura 13.</b> Segmento de red entre compresor, tanque pulmón y secador.....	32
<b>Figura 14.</b> Análisis de consumo de aire comprimido en alimentación de tolva .....	33
<b>Figura 15.</b> Porcentaje de fugas por área.....	37
<b>Figura 16.</b> Propuesta de pistola del punto de soplado para el área de taller de mantenimiento....	43
<b>Figura 17.</b> Pistola punto de soplado área de bodega. ....	43

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Ejemplos de activos que requieren aire comprimido .....	15
<b>Tabla 2.</b> Extracto de la tabla de equivalencias de fugas según la presión. ....	23
<b>Tabla 3.</b> Longitudes y diámetros de la red actual de aire comprimido grupo Mapei.....	26
<b>Tabla 4.</b> Equipos generadores-compresores .....	26
<b>Tabla 5.</b> Equipos de tratamiento-secadores .....	27
<b>Tabla 6.</b> Equipos de tratamiento-filtros .....	28
<b>Tabla 7.</b> Características técnicas de los tanques del sistema .....	29
<b>Tabla 8.</b> Características técnicas adicionales de los tanques del sistema .....	30
<b>Tabla 9.</b> Unidades de mantenimiento.....	31
<b>Tabla 10.</b> Dimensiones de la tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador.....	32
<b>Tabla 11.</b> Volumen de tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador.....	33
<b>Tabla 12.</b> Máquinas consumidoras de aire en planta .....	34
<b>Tabla 13.</b> Presiones y flujos de los elementos consumidores de aire comprimido .....	35
<b>Tabla 14.</b> Descripción de fugas encontradas con ultrasonido .....	36
<b>Tabla 15.</b> SCFM perdidos con respecto al área de la compañía .....	37
<b>Tabla 16.</b> Costos de fugas .....	38
<b>Tabla 17.</b> Propuesta de mejora (Sistema ideal) .....	40
<b>Tabla 18.</b> Datos técnicos del compresor y secador propuestos en el sistema ideal .....	40
<b>Tabla 19.</b> Datos técnicos adicionales del compresor y secador propuestos en el sistema ideal.....	41
<b>Tabla 20.</b> Descarga de aire comprimido en CFM a través de un orificio .....	42

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La compañía MAPEI S.A.S tiene su planta principal en el municipio de La Estrella-Antioquia, la cual se muestra en la Figura 1. En este informe final de trabajo de grado se plantea una auditoría energética a la red de aire comprimido de la empresa, ya que ésta había manifestado la necesidad de cuantificar las pérdidas energéticas de la red. Durante los últimos meses la empresa había manifestado un aumento considerable en cuanto a los costos monetarios de la compañía, por posibles fugas y desperdicios del aire comprimido.

Las pérdidas se deben presumiblemente a malas prácticas de los operadores en cuanto al uso del aire comprimido (utilizándolo para limpiarse el polvo y partículas de contaminación, propias de su oficio) y las condiciones de infraestructura actual. Este análisis tipo auditoría adicionalmente se plantea como un pilar importante dentro de programa anual de gestión del mantenimiento de la empresa.



**Figura 1.** Interior de la planta del grupo MAPEI  
Fuente: Autor

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general

Realizar una auditoria energética de la red de aire comprimido de la planta principal de la empresa Grupo MAPEI.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar el diseño y planos de la red actual de aire comprimido del grupo MAPEI, con ayuda de software Inventor, con el fin de proponer mejoras para un rediseño
- Analizar el consumo energético de la maquinaria, amperaje y voltaje en diferentes horas para detectar patrones en el uso de la energía
- Estimar las fugas en toda la red de aire comprimido del grupo MAPEI con equipo especializado de ultrasonido para estimar las pérdidas de energía por el desperdicio del aire
- Proponer alternativas para la mejora energética de la red de aire comprimido del grupo MAPEI.

## 1.2 Organización de este documento

Este documento está organizado de la siguiente manera:

- El primer capítulo es la introducción del trabajo.
- El segundo capítulo es el marco teórico. En este capítulo se presentan los conceptos claves asociados al aire comprimido y las auditorías energéticas, necesarios para entender el resto del documento.
- El tercer capítulo es la metodología. En este capítulo se explica los métodos, instrumentos y en general el paso a paso seguido para desarrollar la auditoría energética.
- El cuarto capítulo son los resultados. En este capítulo se presentan los diferentes hallazgos, mediciones, cálculos y análisis de la auditoría.
- Finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro a partir de los resultados obtenidos.



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Empresa MAPEI S.A.S.

MAPEI es una empresa multinacional productora de materiales para la construcción fundada en Milán en 1937. Mostrada en la figura 2, la empresa actualmente (Mapei, 2024):

- Tiene 90 subsidiarias en 57 países y 83 plantas de producción en 36 países.
- Tiene más de 10 mil empleados en el mundo
- Fabrica más de 5 mil productos incluyendo adhesivos, selladores y químicos para la industria de la construcción. Incluye desde adhesivos para cemento hasta vinilos súper cubrientes como el bronco.



**Figura 2.** Planta MAPEI de la Estrella, Antioquia  
Fuente: Autor

### 2.2 Red de aire comprimido

Una red de aire comprimido es un circuito neumático conformado por un conjunto de tuberías y accesorios a través del cual se mueve el flujo de aire, desde el compresor hasta la máquina o unidad de servicios donde se utilizará el aire. Hay 3 tipos de redes de aire comprimido muy comunes (LINK compresores, 2024):

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Red abierta: es una sola línea de tubería de la que se desprenden las conexiones secundarias para la conexión de las herramientas.
- Red cerrada (o de anillo): es una línea o circuito en forma de anillo que, a través de su forma, se van distribuyendo las conexiones a las herramientas.
- Red interconectada: es igual a la cerrada, pero tiene implementada accesorios tipo bypass entre las líneas principales para conectar los puntos necesarios para las herramientas.

### 2.3 Partes de una red de aire comprimido

Una estación convencional de aire comprimido industrial se presenta en la Figura 3. Entre el compresor y el suministro final de aire a los usuarios hay elementos tales como el secador refrigerativo, el sistema de filtración, el tanque de almacenamiento, el sistema de purgas automáticas, el sistema separador de condensados y las válvulas de corte.



**Figura 3.** Estación típica de aire comprimido en la industria

Fuente: (Kaeser, 2018)

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 2.3.1 Compresor

El compresor es un dispositivo que aumenta la presión de un gas reduciendo su volumen. El gas a alta presión se puede utilizar para realizar un trabajo mecánico (como mover una herramienta neumática) o realizar un proceso de secado en un proceso industrial (Fernández, 2024). Para seleccionar el compresor se debe comenzar con la cantidad de flujo de aire que se necesitará en una empresa y si se usa o no diferentes niveles de presión a lo largo del día.

Los dos tipos principales de compresores son de desplazamiento positivo y los rotativos. El proceso de compresión tiene lugar en una cámara de trabajo cerrada que disminuye durante el ciclo. Los compresores pueden utilizar pistones, tornillos y émbolos rotatorios para transportar un volumen determinado de gas en cada compresión.

El compresor de tornillo, tal como el mostrado en la Figura 4, es un equipo que comprime el aire en el espacio formado entre los dos rotores (macho y hembra) que giran en sentido opuesto. Junto con la carcasa, componen el elemento de compresión. Los compresores de tornillo suelen contar con un filtro de entrada de aire, el cual disminuye el daño en el interior del compresor, ya que evita que el polvo, la humedad y las partículas de aire entren al sistema.

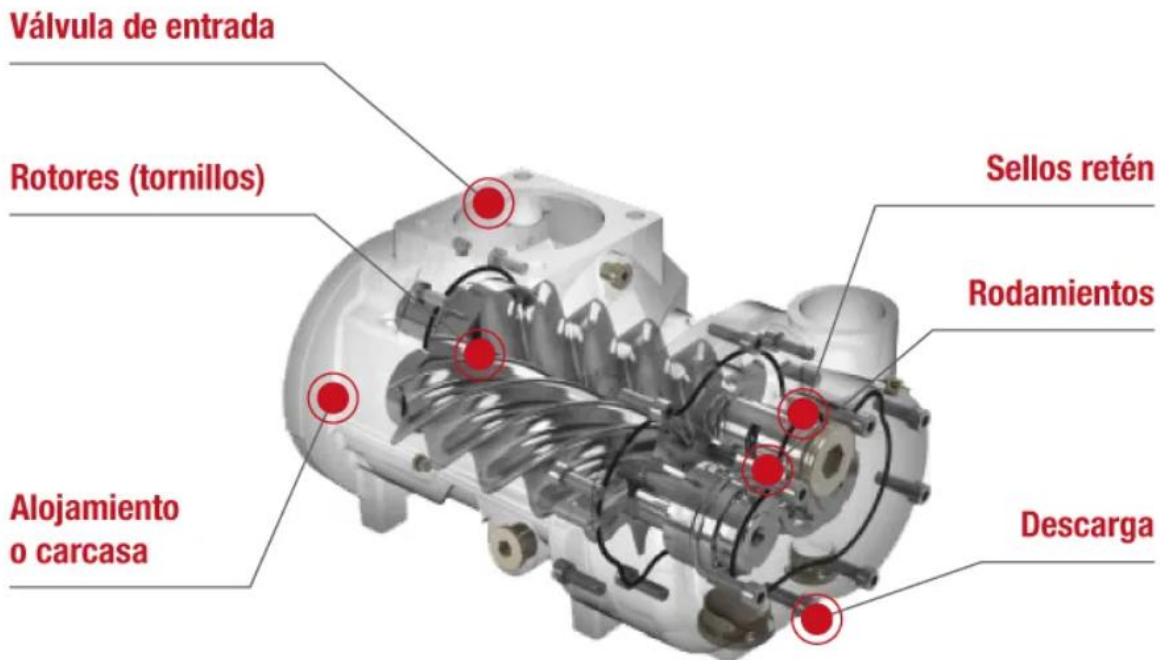


**Figura 4.** Compresor Kaeser 10 hp (derecha). Cuarto de compresión en planta MAPEI (Izquierda).

Fuente: Autor

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la Figura 5 se puede apreciar el despiece de los elementos que conforman la unidad compresora, o donde se hace el respectivo proceso de compresión por el principio antes mencionado de reducir el volumen de un gas (aire ambiente) aumentando su presión al ser comprimido.



**Figura 5.** Partes de un compresor de tornillo  
 Fuente: (Condor group, 2023)

Existen también los compresores dinámicos, en los que se aumenta la energía cinética del gas en el rotor, que luego se transforma para aumentar su presión. El aumento de la presión del gas se produce por la interacción de los elementos móviles (rodete) y los estacionarios (paletas). Este tipo de compresores pueden trabajar con grandes caudales.

Según la carcasa, los compresores pueden ser abiertos, semiherméticos o herméticos, tal como se muestra en la Figura 6. El compresor utiliza por lo general un motor eléctrico que le suministra entrada de trabajo mecánico. Los compresores generan calor durante su operación. Este debe disiparse para evitar que se sobrecaliente y aumentar su rendimiento.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



Compresores **abiertos**



Compresores **semiherméticos**



Compresores **herméticos**

**Figura 6.** Tipos de compresores según la carcasa

Fuente: (Areacooling, 2023)

En los compresores abiertos el motor que acciona el eje es externo al compresor, ya que la potencia se transmite a través de un eje externo, el cual puede estar conectado directamente o a través de un embrague o una transmisión por correa o polea. Como el motor es externo, este puede ser eléctrico, a diésel, a gasolina u operar con cualquier otro combustible o fuente energética. En los semiherméticos el compresor y el motor están dentro de una única carcasa atornillada, la cual es desmontable en caso de requerir mantenimiento. En los compresores herméticos, tanto el compresor como el motor están integrados dentro de la misma carcasa. Si esta es soldada no se puede abrir fácilmente para hacerle mantenimiento, pero como ventaja es que no suelen presentar fugas del gas y son más eficientes energéticamente (Areacooling, 2023).

### 2.3.2 Unidad de mantenimiento neumático

Es una unidad que se ocupa de purificar el aire comprimido antes de que sea utilizado. La unidad se compone de 3 partes fundamentales: Filtro, Regulador y Lubricador, por lo que le suele llamar también FRL. Mostrada en la figura 4, la unidad de mantenimiento cumple por lo tanto 3 funciones principales:

- Filtrar el aire para mantenerlo libre de impurezas, atrapando contaminantes como agua, polvo y aceite.
- Regular constantemente la presión del aire para asegurar que los equipos reciban el suministro necesario.
- Lubricar el aire comprimido para reducir la fricción entre las partes móviles de la maquinaria.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 9.** Ejemplo de unidad de mantenimiento neumático.  
Fuente: (NCI, 2024)

El filtro se utiliza para limpiar el aire comprimido de partículas de suciedad, óxido, sinterización de tuberías y agua condensada. Los filtros de uso general sirven para remover agua y otras partículas de baja densidad, mientras que los coalescentes remueven partículas de aceite. Así mismo también hay filtros que son capaces de remover el vapor de aceite y el olor.

Los reguladores se usan modular la presión y flujo del aire a un valor deseado y preestablecido, independiente de las condiciones externas y del funcionamiento de otros equipos. Para esto la unidad de mantenimiento suele contar con manómetro. Algunos ejemplos de activos industriales que necesitan regulación de aire se presentan en la Tabla 1.

El lubricador agrega al aire comprimido una neblina de aceite, que sirve para reducir el desgaste de las piezas por exceso de fricción, lo que extiende la vida útil de los activos.



**Tabla 1.** Ejemplos de activos que requieren aire comprimido

 <p style="text-align: center;">Pistola de soplado</p>	 <p style="text-align: center;">Equipos de medición de aire</p>
 <p style="text-align: center;">Cilindros neumáticos</p>	 <p style="text-align: center;">Motores de aire</p>
 <p style="text-align: center;">Boquillas de pulverización</p>	 <p style="text-align: center;">Sistemas de lubricación con dispositivo de niebla</p>

Fuente: (Alentec, 2024)

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2.4 Auditorías energéticas

La auditoría de aire comprimido es un reporte detallado del sistema de generación de aire comprimido, que proporciona la información necesaria para tomar mejores decisiones, con el objetivo de ahorrar energía, permitiendo optimizar el rendimiento del sistema de aire comprimido mediante el análisis y monitoreo de variables (presión, flujo, amperaje). Algunas de las mejoras que se pueden detectar en una auditoría de aire son:

- Selección adecuada del diámetro de tubería.
- Ajuste en el sistema de control de compresores (bandas de presión)
- Dimensionamiento adecuado del tanque reservorio o tanque pulmón entre otras.
- Identificar las fugas que se han desarrollado en todo el sistema a lo largo del tiempo.
- Eliminar el uso inadecuado del aire comprimido en toda la planta.
- Calcular la demanda real del compresor para evitar suministrar una presión superior a la necesaria para las aplicaciones.
- Seleccionar las presiones correctas estableciendo la presión de carga y descarga adecuada lo más baja posible para cumplir con las demandas de la aplicación.
- Minimizar la pérdida de presión al mínimo posible.

Las auditorías energéticas en cualquier campo de la industria se encuentran reguladas por la norma internacional ISO 50002, que especifica los requisitos de proceso para llevar a cabo una auditoría energética en relación con el desempeño energético. Ésta es aplicable a todo tipo de establecimientos y organizaciones y a todas las formas y usos de la energía. Esta norma internacional especifica los principios para llevar a cabo auditorías energéticas, los requisitos para los procesos comunes durante las auditorías energéticas y los entregables para las auditorías energéticas (ISO, 2014). Siguiendo las directrices de esta normativa, las auditorías energéticas en aire comprimido se basan en 4 etapas:

- **Etapa1: Análisis del estado actual de la instalación y evaluación de los costos asociados al consumo de energía:** en esta etapa se utilizan instrumentos de medida para evaluar el consumo aire comprimido en equipos más importantes. Estos datos permiten determinar costos totales del consumo de aire.
- **Etapa 2: Localización de pérdidas de aire comprimido:** En esta etapa se realiza localización de las pérdidas de aire comprimido que se detectan por los medidores



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de fugas que actúan por el principio del ultrasonido. Estas fugas pueden estar en la red misma en sus derivaciones o en maquinarias.

- **Etapa 3: Recomendaciones para la optimización del sistema:** En esta etapa es donde los auditores que estén realizando el ejercicio de auditoria proponen una mejora a los hallazgos encontrados en la etapa 1 y 2, como por ejemplo un equipo compresor de mayor hp o un rediseño a la red de aire comprimido.
- **Etapa 4: Control de los procedimientos para el uso de ahorro energético:** En esta etapa es donde se presentan manuales de buenas prácticas a los empleados que intervienen en el uso del aire comprimido, para dar cumplimiento efectivo a la etapa 3.

## 2.5 Estado del arte

Existen varios estudios previos asociados al uso eficiente de aire comprimido. Por ejemplo, en 2021 se elaboró una propuesta técnico-económica para la reducción de los consumos energéticos asociados a la generación de aire comprimido en las instalaciones de RENAULT Sofasa S.A.S (Restrepo Hoyos, 2021). Esta empresa se ha considerado a nivel nacional como una de las empresas más eficientes energéticamente. En este estudio se identificaron diferentes procesos de mejora en la generación de aire comprimido:

- Compra de un compresor de velocidad variable (ZR 400VSD).
- Disminución de la presión de generación para el proceso.
- Instalación de válvulas automáticas para cierre y apertura de zonas del proceso que consumen aire comprimido.
- Identificación de fugas a través de ultrasonido.
- Instalación de compresores de baja capacidad para atención de procesos durante horarios de no producción.
- Instalación de tubería en aluminio para los procesos.
- Instalación de booster para ampliar la presión en las zonas más alejadas.
- Compra de compresores clase cero (ZT 90 y ZT 110).
- Sistema de extracción de calor en estación de generación de aire comprimido.
- Desmonte de tuberías de aire comprimido en desuso.
- Instalación de loops en zona de cabinas de pintura y parque de proveedores.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En 2022 se reporta otro trabajo realizado en la empresa Industrias plásticas Másar S.A.S (Zuluaga Muñoz, Cruz Vargas, & Zapata Zapata, 2022). En dicho estudio se diseñó una nueva red de aire comprimido para así realizar el proceso de alimentación de 3 de sus máquinas y con ello mejorar su efectividad. Para llevar a cabo dicho proceso, los ingenieros encargados del área de mantenimiento realizaron cálculos de la red de aire comprimido, la selección del compresor a utilizar por el sistema de aire y volumen del tanque pulmón, realizando dos conjuntos de planos (mecánicos y eléctricos).

En un estudio realizado en 2021 se plantea un rediseño de la red de aire comprimido en la planta de producción Zootecnia sólidos de la empresa Lucta Gran colombiana S.A.S Para conocer la caída de presión en cada tramo de tubería, se hallan las longitudes equivalentes usando la ecuación de Hazen-Williams. Este método consiste en definir la longitud virtual para cada elemento a instalar en la red de aire aplicando la ecuación de pérdida por fricción. Para hallar la pérdida total, se suma a la longitud de la línea para cada tramo de la tubería con la sumatoria de las longitudes equivalentes de este tramo. Finalmente se realiza la sumatoria para hallar el coeficiente de pérdidas localizadas (Rodriguez Caicedo, 2021).

En la empresa Postobon S.A.S. en 2023 se ha realizado un estudio para la estandarización de materiales (Piping Class) de la red de aire comprimido de alta presión en diferentes plantas de producción (Vélez Sanchez, 2023). Los piping class (documento de estandarización de tuberías) son desarrollados alrededor del código de tuberías que debe ser usado para la aplicación y la lista de componentes fabricados de acuerdo con esa norma. Esto permite usar los mismos componentes en otros proyectos que involucren el mismo fluido sin la necesidad de realizar nuevamente investigaciones, cálculos y selección de materiales, lo cual acarrearía un gasto innecesario de tiempo durante esta parte del proceso. Este autor menciona que los piping class deben contener información tal como los nombres de los elementos presentes en la línea como lo son tuberías, uniones, bridas, empaques, tornillería entre otros.

La relación de los compresores con la eficiencia energética es propuesta por las formas más comunes de desperdiciar energía en los sistemas de aire comprimido por las pérdidas de aire representadas en fugas a lo largo de la red y el mal cálculo del régimen de operación del equipo si no se está aprovechando al 100% su capacidad entregada la mayoría de los cálculos en plantas industriales arrojan que se desperdicia hasta en un 50% la capacidad entregada de las máquinas (Contreras Tavera & Mesa Palacio, 2023).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En otro estudio realizado en 2008 se presenta la fórmula para calcular pérdidas de presión por tubería en la red de aire comprimido, a partir de las cuales se puede basar el rediseño de una nueva red (Gutiérrez Mesa & Facundo Payome, 2008).

En otro estudio previo se realiza se requiere hacer una nueva ampliación de la compañía necesitando realizar una nueva red de aire comprimido, la cual desarrollaron teniendo en cuenta los siguientes criterios matemáticos basados en las fórmulas de cálculo del diámetro de las tuberías, cálculo de la velocidad real, cálculo de la caída de presión y cálculo del caudal (García Ortíz, 2018).

En otro estudio realizado en Barranquilla (Efro Bobadilla, 2019) se encontraron las siguientes oportunidades de mejora después de haber realizado, auditoria energética basada en el aire comprimido por todo este hospital:

- Aumentar el diámetro de las tuberías; reducir la longitud de la red (12%).
- Reparar las fugas periódicamente: del 15 al 50% de la producción de aire fluye a través de las fugas.
- Instalar un sistema con varios valores de presión (sistemas o redes de presión múltiple), separados o conectados entre sí (con el uso de compresores locales sobre compresores). La reducción de la presión de 1 bar proporciona un ahorro de energía del 8%.
- Instalar un control automático de la producción de aire comprimido a través de un compresor de velocidad variable o un control automático de todos los compresores según las necesidades. Ahorro promedio con un control automático (del 5 al 35%).
- Reducir la temperatura de entrada del aire: se obtiene un ahorro de consumo del 1% cada 3 grados.
- Usar trampas de condensado “sin pérdidas de fugas”. Una red de alto rendimiento permite una pérdida de presión máxima del 10% en toda la línea.
- Mejorar y verificar el correcto funcionamiento de las válvulas reguladoras de presión, filtros, lubricadores, secadores y trampas de condensado (2%).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Diseñar adecuadamente las capacidades de almacenamiento para permitir la operación con una mayor salida de compresores y para evitar la activación o desactivación inesperadas.

Y finalmente en un estudio realizado en Tuluá en 2015 (Villota Chavez, Caicedo Franco, & Zuñiga Tellez, 2015), partiendo de las posibles configuraciones de las redes de aire comprimido, los estudiantes decidieron realizar una red tipo c de mayores puntos de conexión para facilitar distintas conexiones en los laboratorios en el futuro.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

Se realizó una visita a la planta de la empresa para llevar a cabo la auditoría. Se llevaron flexómetros o medidores de longitud tipo laser, para calcular distancias de toda la red de aire comprimido incluyendo los diámetros de la tubería. Con esto se hizo un listado de todos los componentes de la red actual. Estas medidas y componentes se registraron en un plano a mano alzada y posteriormente se realizó el diseño de la red actual con ayuda del software Inventor. También se consultaron los manuales de fabricante del compresor y los problemas de mantenimiento reportados por los operarios. Con esto se da cumplimiento al primer objetivo específico.

A continuación, se midió la estimación del consumo energético en la maquinaria, para esto se utilizaron medidores de flujo que se instalaron en cada máquina, tales como los mostrados en la Figura 7. Estos medidores de flujo se instalaron por derivaciones de la red principal, ya sea por codos, racores o “niples”. Estos dispositivos realizaron mediciones periódicas del consumo del aire comprimido y se dejaron instalados allí durante una jornada laboral específica para registrar el consumo del aire en SCFM (pies cúbicos por minuto) de cada equipo.



**Figura 7.** Medidores de flujo en línea para medida de SCFM (Vp flow in line).  
Fuente: autor

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Para realizar medición de fugas se utilizará una pistola con audífonos (tal como la mostrada en la Figura 8) que utiliza el principio del ultrasonido, para escuchar fugas no detectables fácilmente por el oído humano y poder realizar una estimación por la medición de los decibeles utilizando el principio de los SCFM. Con estas mediciones se puede estimar los consumos, las pérdidas y las eficiencias de la red actual y con ello se puede dar cumplimiento al objetivo específico 2.



**Figura 8.** Pistola de ultrasonido 100-UP100-S.  
Fuente: autor.

El fabricante de la pistola de fugas brinda una tabla de equivalencias de decibeles; entre más alto los decibles de sonido de la fuga y más alta la presión de la línea, mayor será el resultado de la pérdida en CFMs. En la Tabla 2 se presenta un extracto a modo de ejemplo de la tabla de equivalencias de fugas que proporciona el fabricante, la cual se adjunta en su totalidad en los anexos de este informe. En esta tabla indica que, para cada decibel de sonido encontrado en las fugas realizadas en la planta hay un valor de CFM de pérdida asociado.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 2.** Extracto de la tabla de equivalencias de fugas según la presión.

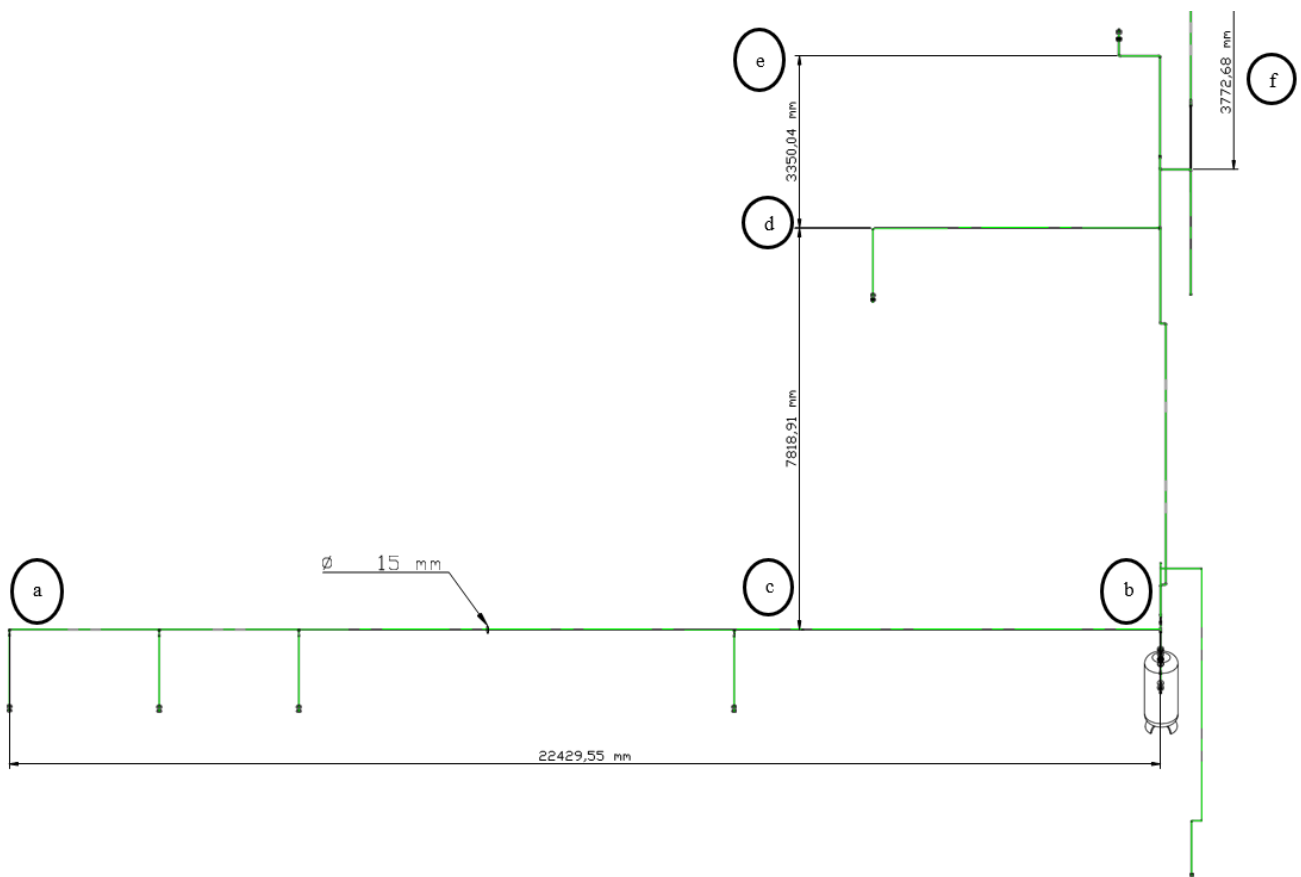
Sensitivity	150 PSI	125 PSI	100 PSI	75 PSI	50 PSI	25 PSI	10 PSI
dB Reading	Leak CFM	Leak CFM	Leak CFM	Leak CFM	Leak CFM	Leak CFM	Leak CFM
1	0,03	0,02	0,01	0,01	0	0	0
<i>Fuente: Autor</i>							

A partir de los resultados obtenidos, se propone alternativas para la mejora energética de la red de aire comprimido del grupo MAPEI. Para cada mejora se determinó el impacto en el consumo de aire comprimido para verificar si efectivamente representa un progreso para la empresa. Con esto se dará cumplimiento al último objetivo específico y al objetivo general del mismo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Elementos de la red de aire comprimido

En la Figura 9, se presenta la primera parte del plano de la red actual de aire comprimido de la compañía MAPEI. En esta figura se aprecian los segmentos de tubería, los cuales se han definido en base a los nodos, enumerados de la letra A hasta la letra F. En esta se pueden apreciar los tramos de tubería empezando desde el inicio de planta y terminado al final de esta. Toda la red de aire comprimido es de tubería de 15 mm.



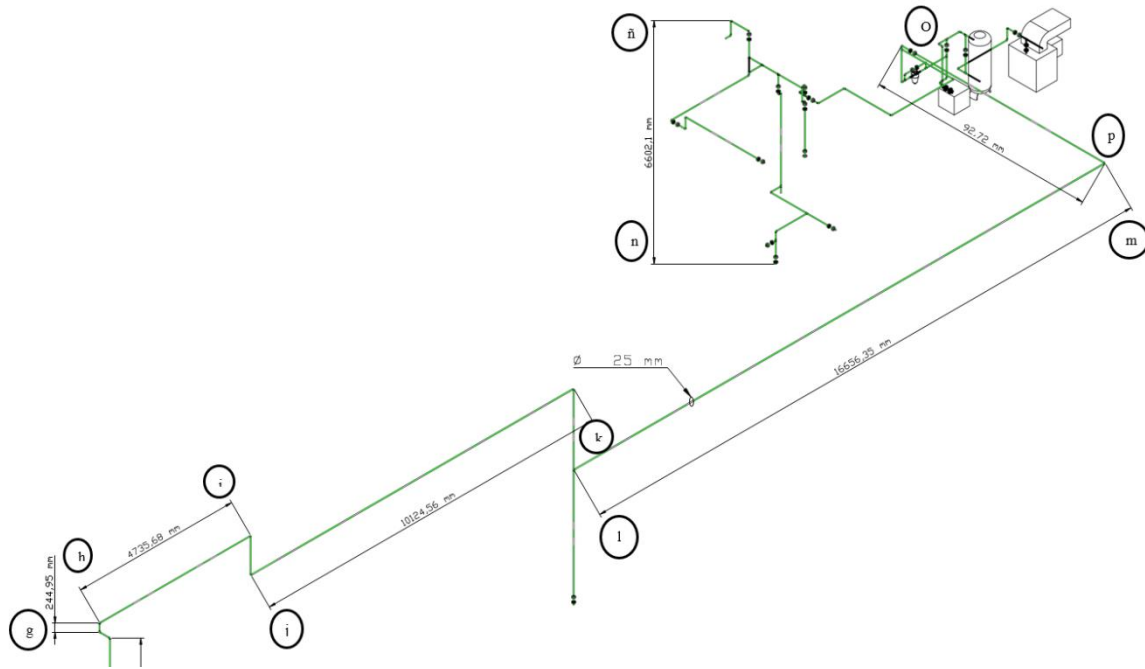
**Figura 9.** Primer segmento de la red de aire comprimido grupo MAPEI, tramo desde inicio de la planta hasta entrada de cuarto de compresores.

Fuente: Autor

En la Figura 10 se encuentra el resto de la red actual de aire comprimido de la compañía Grupo MAPEI. Esta sección comprende el tramo de tubería desde el final de la planta hasta el cuarto de generación o cuarto de compresores. Al igual que el segmento anterior,



toda la tubería es de 15 mm (es decir tubería de ½ pulgada). En esta sección se encuentran los segmentos denominados desde la letra G hasta la letra P explicando sus longitudes en la tabla 3.



**Figura 10.** Segundo segmento de la red de aire comprimido grupo MAPEI, tramo desde final de planta hasta entrada de cuarto de compresores.

Fuente: Autor

En la Tabla 3 se encuentran tabuladas las longitudes y los diámetros de toda la red actual de aire comprimido de la compañía, siendo un constante el diámetro de la tubería, en 15 mm, a excepción de la tubería saliente de la sala de compresores, que muestra un diámetro mayor de 25 mm. Por ser el inicio del tramo de la red allí se debe manejar volumen constante de aire comprimido, para que más adelante al reducir el diámetro de la tubería se garantice la presión constante en toda la red.

**Tabla 3.** Longitudes y diámetros de la red actual de aire comprimido grupo MAPEI

<b>Longitudes y diámetros de la red actual de aire comprimido grupo MAPEI</b>		
<b>Punto</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>diámetro de tubería (∅)</b>
Punto a-b	22429,55	15
Punto c-d	7818,91	15
Punto d-e	3350,04	15
Punto f	3772,68	15
Punto g	244,95	15
Punto h-i	4735,68	15
Punto j-k	10124,56	15
Punto l-m	16656,35	25
Punto n-ñ	6602,1	25
Punto o-p	92,72	25
Fuente: Autor		

En la Tabla 4 se presenta la ficha técnica del compresor de tornillo marca Kaeser instalado para la generación de aire comprimido, con un uso de 8792 horas. Esto significa, de acuerdo recomendaciones técnicas de los fabricantes de compresores, que este equipo a agotado el 43,96% de la vida útil estimada de la unidad generadora de compresión (según el fabricante debería ser reparada en 20000 horas de uso).

**Tabla 4.** Equipos generadores-compresores

<b>Equipos generadores - compresores</b>	
<b>Ítem</b>	1
<b>Equipo</b>	Compresor 1
<b>Zona</b>	Sala de compresores
<b>Marca</b>	Kaeser
<b>Modelo</b>	AS20
<b>Serial N°</b>	1076
<b>Motor principal. HP</b>	20,11
<b>Motor secundario HP</b>	0,74
<b>Capacidad CFM</b>	99
<b>Presión PSIG</b>	125
<b>Tipo</b>	Tornillo
<b>Lubricación</b>	Aceite
<b>Etapas</b>	1
<b>Máx pres. PSIG:</b>	125

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

<b>Voltaje</b>	460,00
<b>Arrancador</b>	Estrella Delta
<b>Enfriamiento</b>	Aire
<b>Velocidad motor RPM</b>	3565
<b>Año de manufactura</b>	2018
<b>Horas totales</b>	8796
<b>Horas en carga</b>	2612
<b>% de uso</b>	29,70%
Fuente: Autor	

En la Tabla 5 se observa la ficha técnica del secador instalado para la generación de aire comprimido, con una capacidad de secado de hasta 111 CFM. Como el compresor genera 99 CFM, se deduce que es el secador adecuado para dicho compresor.

**Tabla 5.** Equipos de tratamiento-secadores

<b>Equipos de tratamiento - secadores</b>	
<b>Ítem</b>	1
<b>Equipo</b>	Secador 1
<b>Zona</b>	Sala de compresores
<b>Marca</b>	Kaeser compresores
<b>Modelo</b>	TCH33
<b>Serial N°</b>	1201
<b>Motor principal HP</b>	1,21
<b>Capacidad CFM</b>	111
<b>Presión Psig</b>	232
<b>Caída presión [PSI]</b>	2,76
<b>Temperatura [°F]</b>	122
<b>Tipo</b>	Refrigerado
<b>Voltaje</b>	220
<b>Voltaje</b>	110
<b>Enfriamiento</b>	Aire
<b>Drenaje</b>	Automático
<b>Conexión drenaje</b>	1/4"
<b>Año de manufactura</b>	2018
Fuente: Autor	

En la Tabla 6 se presenta el filtro de línea, el cual tiene una capacidad de soportar hasta 122 grados de temperatura sin sufrir ningún tipo de deformación por calor. La incorporación de estos filtros de línea no es obligatoria en ninguna configuración de red

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de aire comprimido, pero si es muy necesaria, porque ayudan a eliminar vapores y partículas no deseadas.

**Tabla 6.** Equipos de tratamiento-filtros

<b>Equipos de tratamiento – filtros</b>	
<b>Ítem</b>	1
<b>Equipo</b>	Post filtro de aire
<b>Marca</b>	Kaeser compresores
<b>Modelo</b>	F26KA
<b>Capacidad CFM</b>	92
<b>Temperatura °C</b>	122
<b>Presión PSIG</b>	232
<b>Drenaje</b>	1/2"
<b>Año de manufactura</b>	2018
Fuente: Autor	

En la Figura 11 se presentan los tanques que componen el sistema de almacenamiento de aire comprimido. El primero (a la izquierda) es el tanque húmedo entre secador y compresor llamado “tanque pulmón” del sistema de compresión mientras que el segundo tanque (a la derecha) de color blanco es lateral al cuarto de herramientas. Este último es el encargado de conservar la presión, proveniente del cuarto de compresores la cual que llegará posteriormente a la zona de maquinaria.

Aparte de estas funciones, estos dos tanques también cumplen la función de ayudar al compresor a no estar todo el tiempo en estado de carga, pues al almacenar volúmenes de aire comprimido el compresor no tendrá que encender de manera tan constante. De esta manera, contar con un reservorio de aire para la planta en los tanques contribuye a aumentar los índices de eficiencia energética.



**Figura 11.** Tanque húmedo entre compresor y secador (izquierda), Tanque color blanco lateral a entrada cuarto de herramientas (derecha).  
Fuente: autor

En la Tabla 7 se presenta las características técnicas que tienen cada tanque que pertenece a la red de aire comprimido, los cuales son muy similares. En la Tabla 8 se presentan características adicionales de estos tanques.

**Tabla 7.** Características técnicas de los tanques del sistema

Descripción	Ubicación	Volumen total			Manómetro	
	Zona	m <sup>3</sup>	gal	ft <sup>3</sup>	Si/No	psig
Tanque color blanco lateral a entrada de cuarto de herramientas	Planta	0.639	168,7948	22,56	No	-
Tanque húmedo entre compresor y secador	Sala de compresores	0.525	138,6824	18,54	SI	115
Total		1,164	307,4772	41,1		

Fuente: Autor

**Tabla 8.** Características técnicas adicionales de los tanques del sistema

Descripción	Válvula de seguridad		Drenaje		
	Si/No	Diámetro salida [in]	Auto/Man	Diámetro [in]	% Apertura
Tanque color blanco lateral a entrada de cuarto de herramientas	Si	0,5	Manual	0,5	0
Tanque húmedo entre compresor y secador	Si	0,375	Manual	0,5	0

Fuente: Autor

En la Figura 12 se puede observar la unidad de mantenimiento de la zona de almacenamiento y bodega, que está a una presión de 116 psi, porque los operadores de planta manifiestan la necesidad constante de limpiar partículas de polvo de los elementos de almacenamiento para una mejor manipulación y esta zona además la utilizan para limpiar las partículas de polvo de sus uniformes de trabajo.



**Figura 12.** Unidad de Mantenimiento zona de almacenamiento y bodega.

Fuente: Autor

En la Tabla 9 se presentan las unidades de mantenimiento referentes al sistema, siendo una característica principal, que la presión está regulada entre 33 y 116 psi, siendo la zona de la bodega de almacenamiento la que está regulada a mayor presión por la práctica constante utilizar los puntos de soplado para limpiar las partículas de polvo presentes en el ambiente, y hacer limpieza de maquinaria con aire comprimido.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

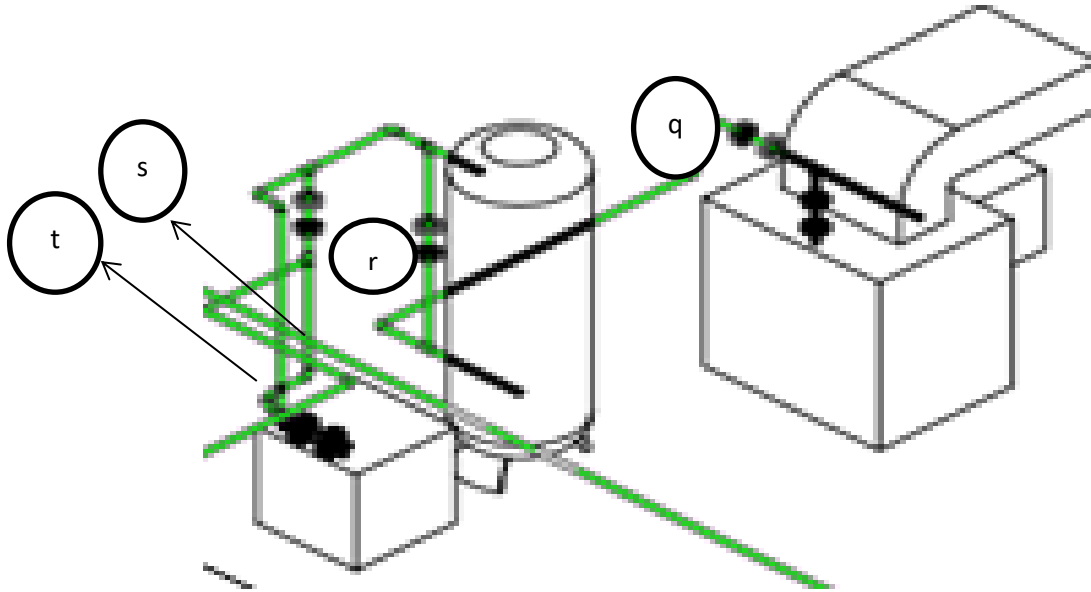
**Tabla 9. Unidades de mantenimiento**

UNIDADES DE MANTENIMIENTO								
#	Zona	Marca Ref.	Descripción	Presión [psi]	Drenaje		Componentes	
					Filtro	Regulador	Lubricador	Comentarios
1	Bodega de almacenamiento		Segundo piso de tolva ARCOMET 7	33,4	X	X		
2	Bodega de almacenamiento	Aireex press W4000 -04	Segundo piso de tolva ARCOMET 7	116		X	X	
3	Bodega de almacenamiento		Primer piso de tolva ARCOMET 7	0	X	X		
4	Bodega de almacenamiento	L400	Tercer piso de tolva ARCOMET 7 (debajode tablero eléctrico Ten-01)	58	X	X	X	Unidad de mantenimiento muy empolvada
5	Bodega de almacenamiento		Tercer piso de tolva ARCOMET 7 (debajode válvula Goyen serial 3787)	100	X	X		Unidad de mantenimiento muy empolvada
6	Agua	Ingersoll Rand ARO	Entrada a zona de almacenamiento de agua	62	X	X		
7	Agua	STCN 85003	Entrada a zona de almacenamiento de agua	70	X	X	X	
8	Agua		Frente a letrero "suministro de agua en planta"	110	X			
9	Planta	Festo	Ingreso de aire a Empacadora Automática	85	X	X	X	
10	Planta		Ingreso de aire a Dispensora #9	118	X	X		
11	Planta		Lateral a Báscula 19	0	X	X		
12	Planta	MG	Bajante en entrada de cuarto de herramientas	103	X	X		
13	Planta	Festo KD43	Ingreso de aire a máquina Solpack EMPI-2000 420	95	X	X	X	Conectada a máquina apagada

Fuente: Autor

## 4.2 Análisis del consumo energético de la maquinaria

En la Figura 13 se presenta un fragmento del plano actual de la red de aire comprimido de la compañía. Se destacan 2 zonas: del compresor al tanque pulmón y del tanque pulmón al secador, por ser estos elementos los que mantienen la presión constante en el consumo de maquinaria. Estas longitudes de este tramo específico de la red de aire comprimido se presentan en la Tabla 10.



**Figura 13.** Segmento de red entre compresor, tanque pulmón y secador  
Fuente: Autor

**Tabla 10.** Dimensiones de la tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador

Red actual de aire comprimido grupo MAPEI		
Punto	Longitud (m)	Diámetro de tubería (∅)
Punto q-r	13,26	1 in
Punto s-t	1,39	0,60 m
Fuente: Autor		

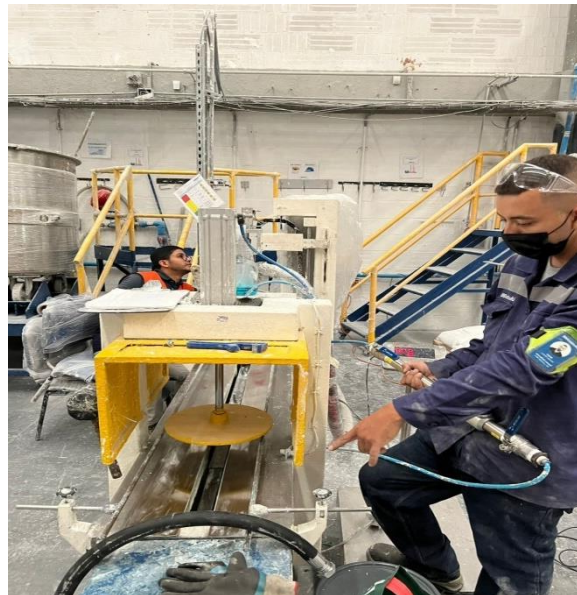
En la Tabla 11 se presenta el resultado del cálculo del volumen de los segmentos de tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador. Este volumen también “almacena” aire comprimido, por lo que en los cálculos se suma al volumen del tanque húmedo.



**Tabla 11.** Volumen de tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador

<i>Volumen de tubería compresor- tanque pulmón y tanque pulmón-secador</i>					
Nomenclatura	Diámetro Tubería	Longitud		Volumen tubería	Volumen almacenamiento
	in	m	in	in <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>
Tubería de aluminio	1	13,26	522,05	410,015	0,234
				Tanque ft <sup>3</sup>	18,54
				TOTAL, ft <sup>3</sup>	18,78
Fuente: Autor					

En la Figura 14 se muestra la realización de la medición para el análisis de consumo de aire, utilizando el punto de alimentación de la tolva, conectando allí el medidor (Vp flow in line) y operando la máquina normalmente, dejando el medidor para que registre los datos de medición explicados en las tablas siguientes. De la misma forma en que se muestra en esta figura se analizan el resto de las máquinas alimentadas con aire comprimido.



**Figura 14.** Análisis de consumo de aire comprimido en alimentación de tolva  
Fuente: autor

En la Tabla 12 se encuentran los consumidores de aire, siendo esta evaluación realizada a diferentes momentos del día en una jornada laboral de 7 a 5 pm. De esta extracción de datos se puede afirmar que la máquina 1 es la de mayor criticidad en el consumo de aire

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

comprimido en planta, puesta esta mantiene una presión promedio de 116,2 psi con una simultaneidad del 100%.

**Tabla 12.** Máquinas consumidoras de aire en planta

Consumidores de aire									
Zona	Máquina	Cant.	Presión prom. [psig]	Flujo unitario [SCFM]	Flujo total [SCFM]	Factor de uso	Simultaneidad	Flujo práctico [SCFM]	Nota
Producción	Máquina 1	1	116,2	12,81	12,8	91%	100%	11,65	Operan la mayoría del turno de 7 a 5, solo tiene un cilindro neumático
Producción	Comec	1	104,7	8,49	8,5	91%	100%	7,72	Operan la mayoría del turno de 7 a 5, no tiene cilindro, pero es una inyección de aire
Producción	Bombas de diafragma	5	109,1	20,74	103,7	7%	40%	2,77	10 min continuos 4 veces al día para pasar material a una zona
Producción	Solpak	1	82,1	1,77	1,8	45%	100%	0,8	Uso diario en turno de 7am a 5pm - Horas de uso en turno: 5 horas
Almacén	Punto de soplado y Tolva	1	115	15,32	15,3	17%	100%	2,55	Se usa 2 veces por día en un turno de 10 hrs
Total, flujo práctico								<b>25,48</b>	SCFM
Fuente: autor									

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la Tabla 13 se puede apreciar, la relación de presiones con respecto al flujo total de las máquinas medidas, siendo el punto de soplado y tolva el elemento que emite mayor flujo total (después de las bombas de diafragma), con un valor de 10,25 CFM.

**Tabla 13.** Presiones y flujos de los elementos consumidores de aire comprimido

<b>Presiones y flujos de los elementos consumidores de aire comprimido</b>										
Zona	Máquina	Cant.	Presión (psi)			Flujo (SCFM)			% del flujo total	Nota
			Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.		
Compresor	Kaeser	1	116,21	125,89	40,61	0,445	0,82	0,01	0,445	Medidor no toma flujo en prueba volumétrica
Producción	Máquina 1	1	104,69	114,58	89,92	2,675	12,81	0,05	2,675	Operan la mayoría del turno de 7 a 5
Producción	Comec	1	109,06	111,68	99,35	0,888	8,49	0,16	0,888	Operan la mayoría del turno de 7 a 5 10 min continuos- 4 veces al día
Producción	Bombas de diafragma	5	82,06	108,2	63,09	12,03	20,74	0,02	60,15	Graco Husky 1050 - 50 gal
Producción	Solpak	1	115	-	-	1,765	1,76	-	1,76	No se pudo medir. Uso diario en turno de 7am a 5pm - Horas de uso en turno 5 horas
Almacén	Punto de soplado y tolva	1	103,33	110,52	97,32	10,25	15,32	0,04	10,2	Más usado de la planta 2 veces al día durante 5 min

Fuente: Autor

### 4.3 Análisis de fugas

En la Tabla 14 se realiza el reporte y descripción de cada una de las fugas realizadas en la compañía siendo la fuga 12 la de mayor pérdida con unos 66 db que equivalen a 1,66 SCFM perdidos a una presión constante de 110 psi, siendo esta la fuga más crítica encontrada durante el proceso de detección con ultrasonido. En la auditoría se encontraron un total de 17 fugas por toda el área que compone la compañía, con una pérdida total de 17,59 SCFM. Las fugas que se describen en la Tabla 14 son realmente sencillas de subsanar, pues no se evidenció que existiera una fuga en la red principal de

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

aire comprimido, pues la mayoría fueron en derivaciones y accesorios, que se pudieron haber deteriorado por uso común.

**Tabla 14.** Descripción de fugas encontradas con ultrasonido

Reporte de fugas en los accesorios					
#	Zona	dB	psig	Descripción	SCFM
1	Compresores	40	125	Fuga en rosca de tuerca 25mm en aluminio ubicada entre descarga del compresor y entrada a tanque	0,926
2	Almacenamiento	40	110,5	Fuga en racor rápido de 8mm x 1/4" en entrada de punto de soplado de máquina ARCOMET 7	0,842
3	Almacenamiento	20	110,5	Fuga en racor 1/2" x 8mm en actuador neumático de máquina ARCOMET 7	0,330
4	Almacenamiento	35	110,5	Fuga en racor rápido 1/2" x 8 mm a la salida de regulador de presión	0,703
5	Almacenamiento	39	110	Fuga en racor rápido 8mm x 1/4" en entrada a punto de soplado	0,811
6	Almacenamiento	65	110	Fuga en racor rápido 1/4" x 8mm en punto de soplado de la báscula	1,621
7	Almacenamiento	62	110,5	Fuga en entrada a Unidad de Mantenimiento en Tee de 12mm (izquierda) - Máquina de almacenamiento Tolva	1,524
8	Almacenamiento	48	110	Fuga en racor rápido 1/2" x 8mm en actuador neumático máq.	1,075
9	Almacenamiento	59	110	Fuga en racor de 1/2" x 8mm en actuador neumático máq.	1,422
10	Aguas	30	110	Fuga en Tee de 8mm ubicada en entrada a aguas residuales	0,569
11	Aguas	57	110	Fuga en manguera rota de 8mm ubicada después de regulador de presión	1,357
12	Planta	66	110	Fuga en racor rápido de 6mm x 1/2" en entrada a dispersor #6	1,655
13	Planta	42	110	Fuga en racor de 1/2" x 8mm en punto de soplado de Empacadora Solpack	0,897
14	Planta	32	110	Fuga en racor rápido 1/8" x 4mm en pistola de soplado de Empacadora Solpack	0,621
15	Planta	57	110	Fuga en racor de 1/2" x 6mm de bomba dispersor	1,357
16	Planta	45	110	Fuga en racor de 1/2" x 8mm en punto de alimentación de empacadora automática	0,985
17	Taller de mantenimiento	40	120	Fuga en racor de 1/4 en taller de mantenimiento	0,893
Total (SCFM)					17,59
Fuente: Autor					

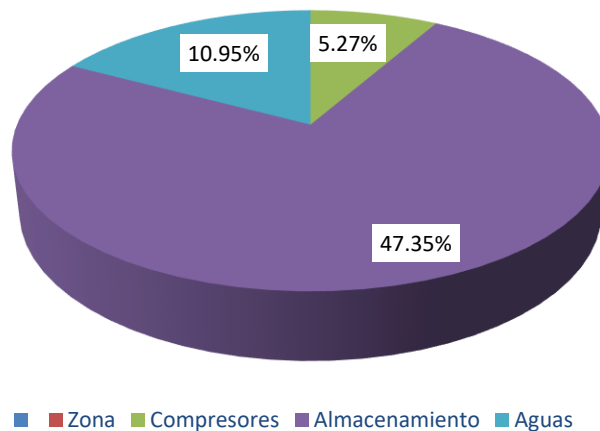
En la Tabla 15 se presenta los SCFM perdidos en fugas con respecto al área de la compañía, siendo la zona de almacenamiento la más afectada con 8,33 SCFM perdidos.

**Tabla 15.** SCFM perdidos con respecto al área de la compañía

Zona	SCFM	Porcentaje (%)
<b>Compresores</b>	0,93	5,27%
<b>Almacenamiento</b>	8,33	47,35%
<b>Aguas</b>	1,93	10,95%
<b>Planta</b>	5,52	31,36%
<b>Taller de mantenimiento</b>	0,89	5,08%
<b>Total</b>	17,59	100%

Fuente: Autor

En la Figura 15 se pueden apreciar los porcentajes de fugas por áreas de la compañía, siendo la zona de almacenamiento el lugar de la compañía con mayor número de porcentaje en fugas con un total de 8 fugas que corresponden al 47,35% de fugas totales



**Figura 15.** Porcentaje de fugas por área.  
Fuente: Autor

La producción de cemento y otros productos de la construcción derivado de los minerales requiere una serie de etapas sucesivas de pretratamiento, tratamiento y transformación, las cuales requieren del consumo de energía eléctrica y térmica para llevarse a cabo. A nivel mundial, esta demanda constituye el 3 % del total de la energía generada (Aristizábal-Alzate & González-Manosalva, 2021). Por lo tanto, es importante contar con

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

un indicador energético que permita cuantificar la eficiencia en la conversión energética con el fin de poderlo mejorar. Para este caso, el análisis de consumos energéticos permite determinar un indicador de eficiencia energética 3,3 SCFM/HP para la empresa.

En la

Tabla **16** se encuentra que la compañía trabaja en promedio 2200 horas por año, pagan un costo de \$739,8 por cada kW/h, teniendo los SCFM perdidos por fugas y a presión constante de 110 psi (17,58). Si se divide por el indicador energético de la compañía (3,13), este resultado indica los hp fugados (5,61) los cuales se convierten de hp a kW (4,19) y este valor se multiplica por el promedio de horas anuales que trabaja la compañía, lo que permite conocer los kWh/año, a partir de la pérdida de los SCFM encontrados durante el análisis de fugas.

**Tabla 16.** Costos de fugas

<b>Costos de fugas</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>PÉRDIDA DEBIDO A FUGAS</b>	
Cantidad de Fugas	17	Costo kWh [COP]	739,8
SCFM fugado [@ 110 Psig]	17,58991019	hp fugado	5,619779612
Indicador Energético [SCFM / HP]	3,13	kW fugado	4,190669657
Horas de funcionamiento	2200	kWh/año	9219,473245
Fuente: Autor			

Se puede concluir que los costos de fugas para la compañía por pérdidas de CFM son muy altos anualmente, pues si se hace la multiplicación de 9219,4 kWh/año por el costo unitario de 739,8 kW/h daría que el costo total de fugas para la compañía es de \$6.820,512 pesos anuales. Mensualmente esto se traduce en que la compañía está desperdiciando 568,376 pesos en costos de energía totalmente no aprovechables.

#### 4.4 Oportunidades de mejora y ahorro energético

De manera resumida, los resultados obtenidos en la anterior sección fueron:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- El consumo total de aire teórico debido a la maquinaria es 142,1 CFM (Tabla 12), pero en la práctica los equipos consumen solo 25,48 CFM (Tabla 13) ya que no todos operan en simultánea.
- Las pérdidas totales de aire de la compañía son 17,59 CFMs (Tabla 14).
- El compresor actualmente instalado en la compañía tiene una capacidad máxima de 99 CFM (Tabla 4), el cual abastece adecuadamente la demanda actual de aire de la empresa.

A continuación, se presentan diversas oportunidades de mejora y ahorro energético analizados en este trabajo

#### 4.4.1 Sistema ideal con alternativas de mejora

En la Tabla 17 se presenta una alternativa de mejora para la mayor eficiencia de consumo energético de la compañía desde el cambio de su equipo generador, secador y filtro de línea, utilizando estos como equipos principales y los actualmente instalados como un respaldo. Estos equipos son de la marca FS-Curtis, actualmente una marca globalizada para equipos de aire comprimido, los cuales tienen la ventaja de ser equipos que cuentan con variador de velocidad para los altibajos de tensión que se encuentran en la mayoría de las plantas industriales.

Aunque el compresor actualmente instalado está por encima de las CFM de aire requeridas, este equipo trabaja siempre a velocidad constante de 3565 rpm (Tabla 4), y a una capacidad máxima de entrega. Se podría mejorar el sistema con un cambio de equipo que no siempre esté trabajando a un 100%, sino que tenga velocidad variable y una capacidad de entrega más cercana a la necesidad específica de la planta, por los diferentes factores de simultaneidad en las máquinas (Tabla 12). Dicho equipo se describe en la Tabla 17 y sus principales características son:


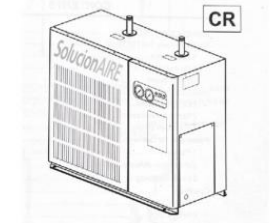

- ✓ Compresor de 18,37 HP
- ✓ Capacidad mínima de entrega de aire: 18,4 CFM
- ✓ Capacidad máxima de entrega de aire: 57,3 CFM (a 125 Psi)

Con solo cambiar el equipo por uno de menor capacidad en HP, la empresa se estaría ahorrando 1.8 kW aproximadamente. Dado que la empresa trabaja en promedio 2200 horas anuales y que el costo de la electricidad que paga es 739,8 \$/kWh. (Tabla 16), el ahorro anual de la compañía sería:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1.8 kW\*2200 h/año\*739,8 \$/kWh= \$2,9 millones de pesos de ahorro anual.

**Tabla 17.** Propuesta de mejora (Sistema ideal)

<b>Propuesta de mejora (sistema ideal)</b>				
<b>Imagen de referencia</b>	<b>Alternativa</b>	<b>Potencia Máxima [hp]</b>	<b>Capacidad [cfm]</b>	<b>Respaldo</b>
	Compresor de velocidad variable con secador externo y filtros (NxV11)	18,37	57,3 – 18,4 (a 125 psig)	Compresor Kaeser de 20 HP de Mapei
	Secador CR80	1,21	85	Secador Kaeser TCH33
	Pre-filtro FFA15P	0	70	-
	Post-filtro FFA15H	0	70	Filtro Kaeser F26KA
Fuente: Autor				

En la Tabla 18 y la Tabla 19 se especifican los datos técnicos del nuevo compresor y secador que se está planteando en la propuesta de sistema ideal: se trata de un modelo Nxv-11 de la compañía FS-Curtis, con unos CFM mínimos de 18,24, que es aún más que la compañía actualmente presenta como pérdida por fugas.

**Tabla 18.** Datos técnicos del compresor y secador propuestos en el sistema ideal

<b>Datos técnicos del compresor y secador propuestos en el sistema ideal</b>				
<b>Equipo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad [cfm]</b>		<b>Presión [Psig]</b>
		<b>Máxima</b>	<b>Mínima</b>	
Compresor	NxV-11	57,32	18,24	125
Secador	CR80	85	-	125
Fuente: Autor				



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>			Código	FDE 089
				Versión	04
				Fecha	24-02-2020

**Tabla 19.** Datos técnicos adicionales del compresor y secador propuestos en el sistema ideal

Datos técnicos adicionales del compresor y secador propuestos en el sistema ideal							
Equipo	Potencia		Indicador energético	Dimensiones (in)			Peso (libras)
	kW	hp		L	W	H	Montado sobre tanque
Compresor	11	15	3,4	1701	711	1701	461
Secador	0,9	1,2	70,4	797	440	705	42
Fuente: Autor							

#### 4.4.2 Propuesta de protocolo de limpieza y soplado

La planta tiene instalados 9 puntos de soplado y de esos puntos de soplado 6 están regulados y filtrados, en un caso hipotético que todos estos puntos de soplado estuvieran abiertos de manera simultánea el consumo total sería 254,66 SCFM. Partiendo de esta hipótesis se propone la implementación de las siguientes acciones para generar un ahorro de consumo en SCFM:

- ✓ Reducir los diámetros: Por cada diámetro que se reduzca, en la manguera se ahorrara al menos un 30% de aire.
- ✓ Utilizar adecuadamente los reguladores de presión: Cada libra reducida ahorra un 0,5% de la energía requerida para producir el caudal.
- ✓ Uso de boquillas ahorradoras: Limitan y direccionan el aire que sale aumentando la eficiencia en el proceso y disminuyendo la cantidad de aire.
- ✓ Regulación y filtración en todos los puntos de aire para mayor eficiencia y calidad.
- ✓ Otra alternativa es hacer un circuito cerrado o en anillo y a aumentar el diámetro de la tubería principal.

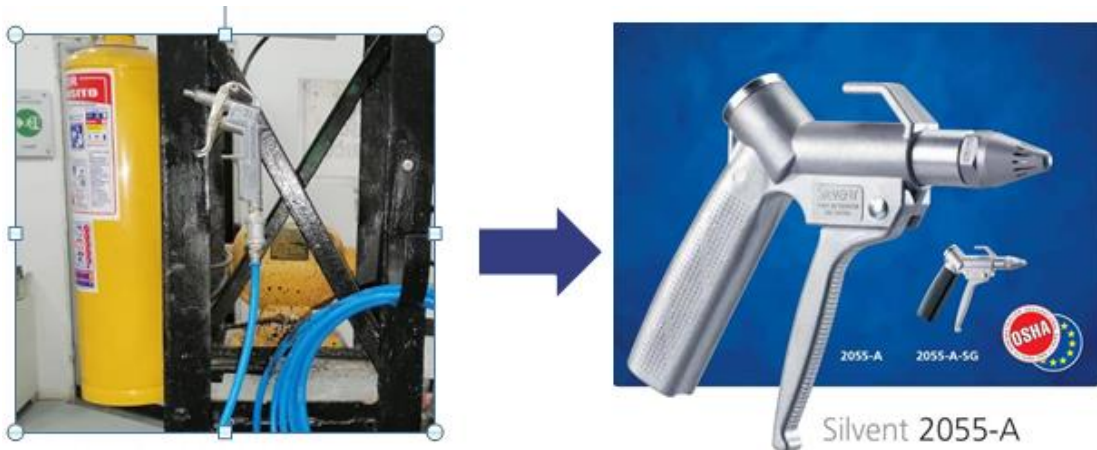
En la Tabla 20 se presenta como cambiando el diámetro del orificio de descarga de los puntos de soplado, según la presión de la línea o del compresor, se puede obtener más o menos CFM a una presión constante, que se pueden utilizar de acuerdo con la necesidad en particular. Se puede apreciar cómo con relación al diámetro de una boquilla con respecto a la presión en la línea, se puede utilizar los CFM a nuestro favor, de mayor o menor cantidad según sea la necesidad.

**Tabla 20.** Descarga de aire comprimido en CFM a través de un orificio

Descarga de aire comprimido en CFM a través de un orificio												
Diámetro	Presión PSIG											
mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
2	1,52	1,96	2,53	3,1	3,6	4,23	4,8	5,4	5,9	6,49	7,05	7,62
3	6,07	7,86	10,1	12,4	14,7	16,9	19,2	21,4	23,7	26	28,2	30,5
6	24,3	31,4	40,5	49,6	58,6	67,6	76,7	85,7	94,8	104	113	122
10	54,6	70,7	91,1	112	132	152	173	193	213	234	254	274
13	97	126	162	198	235	271	307	343	379	415	452	488
16	152	196	253	310	366	423	479	536	592	649	705	762
19	218	283	365	446	528	609	690	771	853	934	1016	1097
22	297	385	496	607	718	828	939	1050	1161	127	1383	144
25,4	388	503	648	793	938	1082	1227	1371	1516	1661	1806	1951
Fuente: (Alentec, 2024)												

#### 4.4.3 Otras posibilidades de ahorro

Para los puntos de soplado se sugiere la instalación de pistolas modelo Silvent 2055-A, el cual proporciona un ahorro del 22% del consumo actual de estos puntos y reduce el nivel de ruido hasta en un 65%. En la figura 20 se puede apreciar que la pistola modelo Silvent 2055-A, sería la pistola ideal y más utilizada en el mercado para puntos de soplado de aire comprimido.



**Figura 16.** Propuesta de pistola del punto de soplado para el área de taller de mantenimiento.

Fuente: (Silvent, 2024)

En las situaciones en las que sea necesario utilizar aire comprimido para la limpieza de máquinas o espacios, se recomienda utilizar la boquilla modelo Silvent 011 que proporciona un ahorro del 37% y por su direccionamiento una mayor eficiencia, además de reducir un 62% el ruido en cada operación, tal cual como se puede apreciar en la Figura 17.



**Figura 17.** Pistola punto de soplado área de bodega.

Fuente: (Silvent, 2024)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Como resultado de la auditoría energética realizada en este trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se levantaron los planos al hacer la medición de las longitudes de los tramos, describiendo de manera detallada cómo está compuesta la red actual de aire comprimido de la compañía. En este caso no se realiza un rediseño de la red, pero se llega a la determinación que el mejor circuito de la red de aire comprimido para no tener pérdidas de presión en todos los tramos es el anular o circulatorio, pues en este momento la compañía cuenta con una red de aire comprimido abierta.
- Dentro de las características técnicas para un sistema ideal se puede concluir, que aunque el equipo FS-Curtis Nxv11, tiene una capacidad máxima de 57,32 CFM de entrega y que teóricamente sería de menor capacidad que el equipo kaeser actualmente instalado en la planta que cuenta con 99 CFM de entrega, el FS-Curtis es un equipo mucho mejor porque solo entregara los CFM adecuados en el momento adecuado de acuerdo a la necesidad de la planta, por ser un equipo que cuenta con variador ABB haciendo el motor con una velocidad variable, sin desperdicios de energía y con una capacidad mínima de 18,24 CFM.
- En el consumo de maquinaria se puede concluir que la mayor demanda que se ha visto en la planta es causada por las bombas de diafragma (112,03 CFM). Esas bombas se prenden 10 minutos 4 veces en el día en el turno de 7 a 5 pm. La posibilidad que se plantea para mejorar este consumo alto sería poder cambiar estas dos bombas por un motor soplador de 5 hp que no utilice aire comprimido.
- El punto de soplado del almacén es el más usado, ya que requiere 10,25 CFM a presión constante de 110 psi. Es un consumo crítico por la mala práctica de los operadores de retirarse las partículas de polvo de sus uniformes y de la maquinaria misma; se recomienda las campañas de sensibilización sobre los riesgos a la salud de esta práctica, como lo son la incrustación de partículas en la piel. Se solicita a la planta que migre a un sistema de limpieza con paños húmedos reutilizables.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Las 17 fugas que se encontraron todas pueden ser corregidas de manera muy rápida, pues ninguna se encuentra en la red principal, la mayoría solo son accesorios como racores de 1/4" o de 1/2.".
- Si las fugas son corregidas los hp fugados serian 0, y esto conllevaría a un ahorro muy significativo en la energía consumida, porque el costo de los kilowatts anuales sería realmente los consumidos y no los fugados causado por la pérdida de hps en fugas.
- Por último, se propone empezar a implementar los sistemas de mejora con lo que actualmente se está usando en la industria, que es cambiar pistolas y boquillas de soplado por unas mejoras (en este caso de la marca Silvent). Estas boquillas se les puede realizar adaptación de diámetro de acuerdo con la necesidad y como la planta trabaja a una presión constante de 110 psi, sería ideal instalar boquillas de 1/16" que solo emitiría 7,05 CFM, y se ahorrarían 5,0 CFMs.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alentec. (22 de 03 de 2024). *Alentec & Orion AB*. Obtenido de <https://www.alentec.com/es/>
- Areacooling. (10 de 1 de 2023). *Compresores - definición, clasificación y tipos*. Obtenido de [https://areacooling.com/areacademy/es/compresores-definicion-clasificacion-y-tipos/#%C2%BFQue\\_es\\_un\\_compresor\\_y\\_como\\_funciona](https://areacooling.com/areacademy/es/compresores-definicion-clasificacion-y-tipos/#%C2%BFQue_es_un_compresor_y_como_funciona)
- Aristizábal-Alzate, C., & González-Manosalva, J. (2021). Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial. *Revista UIS ingenierías*, 3, 91-110. doi:10.18273/revuin.v20n3-2021006
- Condor group. (22 de 12 de 2023). *Partes y Componentes de un Compresor Rotativo De Tornillo*. Obtenido de <https://condorgroup.com.ar/partes-y-componentes-de-un-compresor-rotativo-de-tornillo/>
- Contreras Tavera, J. F., & Mesa Palacio, F. A. (2023). *Construcción de un modelo financiero para el suministro de soluciones de aire comprimido para la industria*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Efro Bobadilla, J. C. (2019). *Evaluación de la eficiencia energética del sistema de aire comprimido en una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla*. Barranquilla: Universidad de la costa CUC.
- Fernández, P. (27 de 05 de 2024). *Compresores*. Obtenido de <https://www.pfernandezdiez.es/es/libro?id=9>
- García Ortíz, J. F. (2018). *Diseño y montaje de una red de aire comprimido para la nueva planta de la empresa MET group*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gutiérrez Mesa, F., & Facundo Payome, J. A. (2008). *Desarrollar un plan de mejoramiento para la red de aire comprimido de la planta de producción SOFASA Envigado*. Medellín: Universidad EAFIT.
- ISO. (2014). *ISO 50002 Energy audits - Requirements with guidance for use*. Ginebra: ISO.
- Kaeser. (2018). *Técnica de aire comprimido*. Villanueva de Gállego: Kaeser. Obtenido de <https://cya.eus/wp-content/uploads/2018/06/INFORMACION-TECNICA-SOBRE-AIRE-COMPRIMIDO.pdf>

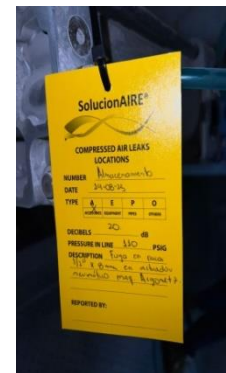
	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- LINK compresores. (22 de 03 de 2024). *¿Qué es una red de aire?* Obtenido de <https://www.linkcompresores.com.co/que-es-una-red-de-aire/>
- Mapei. (22 de 03 de 2024). *Nuestros productos.* Obtenido de <https://www.mapei.com/co/es-co/productos/lista-de-productos?page=14>
- NCI. (22 de 03 de 2024). *Unidad de mantenimiento.* Obtenido de <https://www.neumaticaycontrol.com.co/site/cb/todos-los-productos/26-2038-unidad-de-mantenimiento.html>
- Restrepo Hoyos, F. J. (2021). *Propuesta Técnico-Económica para la reducción de los consumos energéticos asociados a la generación de Aire Comprimido en las instalaciones de RENAULT Sofasa S.A.S.* Medellín: Instituto tecnológico metropolitano.
- Rodriguez Caicedo, M. (2021). *Rediseño de la red de distribución de aire comprimido para la planta de producción Zootecnia Sólidos de la empresa Lucta Grancolombiana SAS.* Bogotá: Universidad Antonio Nariño).
- Silvent. (27 de 05 de 2024). *Air blow gun - high blowing force Silvent 2055-A.* Obtenido de <https://www.silvent.com/en-eu/products/alternatives-en-eu/2055-a/>
- Silvent. (27 de 05 de 2024). *Boquilla de aire Silvent 011.* Obtenido de <https://www.silvent.com/es/productos/boquillas-de-aire/011/>
- Vélez Sanchez, J. (2023). *Creación del documento de estandarización de materiales (Piping Class) para la red de aire comprimido de alta presión en diferentes plantas de producción de la empresa Postobón S.A.* Medellín: Universidad de Antioquia.
- Villota Chavez, C. A., Caicedo Franco, L. M., & Zuñiga Tellez, J. S. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de aire comprimido para el prototipo de planta de manufactura flexible del laboratorio de Ingeniería Industrial ubicado en la Unidad Central del Valle en la ciudad de Tuluá.* Tuluá: Unidad central del Valle del Cauca.
- Zuluaga Muñoz, I. D., Cruz Vargas, R. F., & Zapata Zapata, E. R. (2022). *Diseño de la red de aire comprimido para las máquinas inyectoras Welltec y la sopladora SAFIMO del proceso de inyección de plástico en la empresa industrias plásticas Moser S.A.S.* Medellín: Instituto tecnológico metropolitano.



# ANEXOS

## Anexo a: Fotos de evidencias de fugas



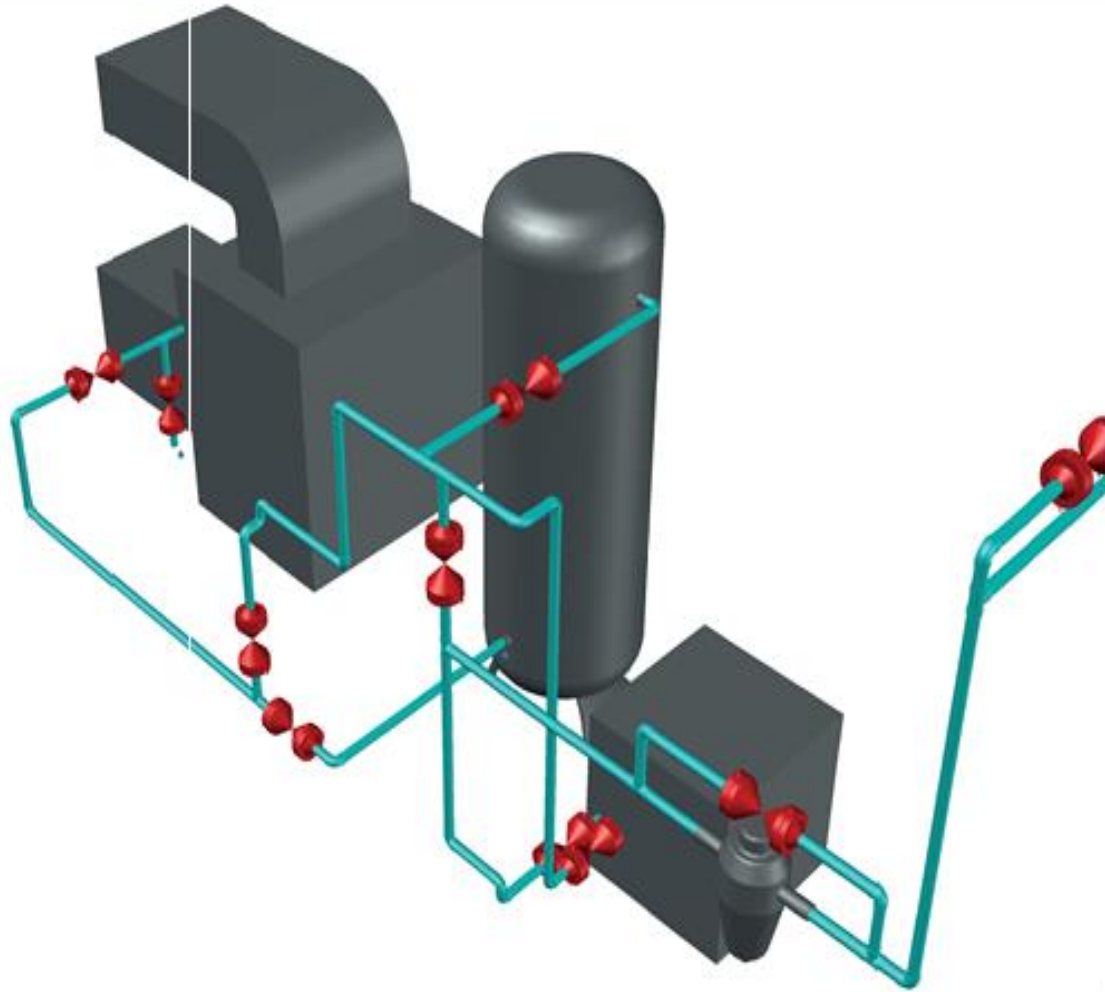


Sensitivity dB Reading	150 PSI Leak CFM	125PSI Leak CFM	100 PSI Leak CFM	75 PSI Leak CFM	50 PSI Leak CFM	25 PSI Leak CFM	10 PSI Leak CFM
1,00	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	\$0,00	0,00
2,00	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	\$0,00	0,00
3,00	0,12	0,09	0,07	0,04	0,02	\$0,01	0,00
4,00	0,17	0,13	0,10	0,07	0,03	\$0,01	0,01
5,00	0,25	0,17	0,13	0,09	0,05	\$0,02	0,01
6,00	0,29	0,22	0,17	0,12	0,06	\$0,03	0,02
7,00	0,35	0,27	0,21	0,15	0,08	\$0,04	0,02
8,00	0,42	0,32	0,26	0,18	0,10	\$0,05	0,03
9,00	0,49	0,38	0,30	0,22	0,13	\$0,07	0,04
10	0,55	0,44	0,35	0,26	0,15	\$0,08	0,05
11	0,63	0,50	0,40	0,30	0,18	\$0,10	0,06
12	0,70	0,56	0,45	0,34	0,20	\$0,12	0,07
13	0,77	0,62	0,51	0,38	0,23	\$0,14	0,08
14	0,85	0,69	0,56	0,43	0,27	\$0,16	0,10
15	0,93	0,75	0,62	0,47	0,30	\$0,18	0,11
16	1,01	0,82	0,68	0,52	0,33	\$0,20	0,13
17	1,09	0,89	0,74	0,57	0,37	\$0,23	0,14
18	1,17	0,96	0,80	0,62	0,41	\$0,26	0,16
19	1,25	1,03	0,86	0,67	0,44	\$0,28	0,18
20	1,34	1,11	0,93	0,73	0,48	\$0,31	0,20
21	1,42	1,18	0,99	0,78	0,53	\$0,34	0,22
22	1,51	1,26	1,06	0,84	0,57	\$0,38	0,25
23	1,60	1,34	1,13	0,90	0,61	\$0,41	0,27
24	1,69	1,41	1,20	0,96	0,66	\$0,44	0,29
25	1,78	1,49	1,27	1,02	0,71	\$0,48	0,32
26	1,87	1,57	1,35	1,08	0,75	\$0,52	0,35
27	1,96	1,66	1,41	1,14	0,80	\$0,56	0,38
28	2,05	1,74	1,49	1,21	0,86	\$0,60	0,40
29	2,15	1,82	1,56	1,27	0,91	\$0,64	0,44
30	2,24	1,91	1,64	1,34	0,95	\$0,68	0,47
31	2,34	1,99	1,72	1,40	1,02	\$0,73	0,50
32	2,43	2,08	1,79	1,47	1,07	\$0,77	0,53
33	2,53	2,17	1,87	1,54	1,13	\$0,82	0,57
34	2,63	2,25	1,95	1,61	1,19	\$0,87	0,61
35	2,73	2,34	2,03	1,68	1,25	\$0,92	0,64
36	2,83	2,43	2,12	1,76	1,31	\$0,97	0,68
37	2,93	2,53	2,20	1,83	1,37	\$1,02	0,72
38	3,03	2,62	2,28	1,91	1,43	\$1,07	0,76
39	3,13	2,71	2,37	1,98	1,50	\$1,13	0,81
40	3,23	2,80	2,45	2,06	1,56	\$1,18	0,85
41	3,33	2,90	2,54	2,14	1,63	\$1,24	0,89
42	3,44	2,99	2,63	2,21	1,69	\$1,30	0,94
43	3,54	3,09	2,71	2,29	1,76	\$1,36	0,99
44	3,65	3,18	2,80	2,37	1,83	\$1,42	1,03
45	3,75	3,28	2,89	2,45	1,90	\$1,48	1,08
46	3,86	3,38	2,98	2,54	1,98	\$1,55	1,13
47	3,97	3,48	3,07	2,62	2,05	\$1,61	1,19
48	4,07	3,58	3,17	2,70	2,12	\$1,68	1,24
49	4,18	3,68	3,26	2,79	2,20	\$1,75	1,29
50	4,29	3,78	3,35	2,87	2,27	\$1,82	1,35
51	4,40	3,88	3,45	2,96	2,35	\$1,89	1,41
52	4,51	3,98	3,54	3,05	2,43	\$1,96	1,46
53	4,62	4,09	3,64	3,14	2,51	\$2,03	1,52
54	4,73	4,19	3,73	3,23	2,59	\$2,11	1,58
55	4,84	4,29	3,83	3,32	2,67	\$2,18	1,64
56	4,96	4,40	3,93	3,41	2,75	\$2,26	1,71
57	5,07	4,51	4,03	3,50	2,84	\$2,34	1,77
58	5,18	4,61	4,13	3,59	2,92	\$2,42	1,84
59	5,29	4,72	4,23	3,68	3,01	\$2,50	1,90
60	5,41	4,83	4,33	3,78	3,09	\$2,58	1,97
61	5,52	4,93	4,43	3,87	3,18	\$2,66	2,04
62	5,64	5,04	4,53	3,97	3,27	\$2,75	2,11
63	5,76	5,15	4,63	4,06	3,35	\$2,83	2,18
64	5,87	5,26	4,74	4,16	3,45	\$2,92	2,25
65	5,99	5,37	4,84	4,26	3,54	\$3,01	2,33
66	6,11	5,48	4,95	4,36	3,63	\$3,10	2,40
67	6,22	5,59	5,05	4,46	3,72	\$3,19	2,48
68	6,34	5,71	5,16	4,56	3,82	\$3,28	2,56
69	6,46	5,82	5,26	4,66	3,91	\$3,37	2,63
70	6,58	5,93	5,37	4,76	4,01	\$3,47	2,71
71	6,70	6,05	5,48	4,86	4,11	\$3,56	2,80
72	6,82	6,16	5,59	4,96	4,20	\$3,66	2,88
73	6,94	6,28	5,70	5,07	4,30	\$3,76	2,96
74	7,06	6,39	5,80	5,17	4,40	\$3,86	3,05
75	7,18	6,51	5,92	5,28	4,50	\$3,96	3,13
76	7,31	6,62	6,03	5,38	4,61	\$4,06	3,22
77	7,43	6,74	6,14	5,49	4,71	\$4,16	3,31
78	7,55	6,86	6,25	5,59	4,81	\$4,27	3,40
79	7,67	6,98	6,36	5,70	4,92	\$4,37	3,49
80	7,80	7,10	6,47	5,81	5,02	\$4,48	3,58
81	7,92	7,21	6,59	5,92	5,13	\$4,59	3,67
82	8,05	7,33	6,70	6,03	5,24	\$4,70	3,77
83	8,17	7,45	6,82	6,14	5,34	\$4,81	3,87
84	8,30	7,57	6,93	6,25	5,45	\$4,92	3,96
85	8,42	7,70	7,05	6,36	5,56	\$5,03	4,06
86	8,55	7,82	7,16	6,48	5,67	\$5,14	4,16
87	8,68	7,94	7,28	6,59	5,79	\$5,25	4,26
88	8,80	8,06	7,40	6,70	5,90	\$5,38	4,36
89	8,93	8,18	7,52	6,82	6,01	\$5,49	4,47
90	9,06	8,31	7,64	6,93	6,13	\$5,61	4,57
91	9,19	8,43	7,75	7,05	6,24	\$5,73	4,68
92	9,31	8,56	7,87	7,16	6,36	\$5,86	4,79
93	9,44	8,68	7,99	7,28	6,47	\$5,98	4,90
94	9,57	8,81	8,12	7,40	6,59	\$6,10	5,01
95	9,70	8,93	8,24	7,52	6,71	\$6,23	5,12
96	9,83	9,06	8,36	7,64	6,83	\$6,35	5,23
97	9,96	9,19	8,48	7,76	6,95	\$6,48	5,34
98	10,09	9,31	8,60	7,88	7,07	\$6,61	5,46
99	10,22	9,44	8,73	8,00	7,19	\$6,74	5,57
100	10,36	9,57	8,85	8,12	7,32	\$6,87	5,69
101	10,49	9,70	8,97	8,24	7,44	\$7,00	5,81
102	10,62	9,83	9,10	8,36	7,57	\$7,14	5,93
103	10,75	9,95	9,22	8,48	7,69	\$7,27	6,05
104	10,88	10,08	9,35	8,61	7,82	\$7,41	6,17
105	11,02	10,21	9,48	8,73	7,95	\$7,54	6,30
106	11,15	10,35	9,60	8,86	8,07	\$7,68	6,42
107	11,29	10,48	9,73	8,98	8,20	\$7,82	6,55
108	11,42	10,61	9,86	9,11	8,33	\$7,96	6,68
109	11,55	10,74	9,98	9,24	8,46	\$8,11	6,81
110	11,69	10,87	10,11	9,36	8,59	\$8,25	6,94
111	11,82	11,00	10,24	9,49	8,73	\$8,39	7,07
112	11,96	11,14	10,37	9,62	8,86	\$8,54	7,20
113	12,10	11,27	10,50	9,75	8,99	\$8,69	7,34
114	12,23	11,40	10,63	9,88	9,13	\$8,83	7,47
115	12,37	11,54	10,76	10,01	9,26	\$8,98	7,61
116	12,51	11,67	10,89	10,14	9,40	\$9,13	7,75
117	12,64	11,81	11,03	10,27	9,54	\$9,29	7,89
118	12,78	11,94	11,16	10,40	9,67	\$9,44	8,03
119	12,92	12,08	11,29	10,53	9,81	\$9,59	8,17
120	13,06	12,22	11,42	10,67	9,95	\$9,75	8,31

Anexo b: Tabla UE, brindada por fabricante de la pistola de fugas pistola ultrasonido 100-UP100-S., equivalencia entre diámetro de tubería y decibles de perdida en CFM.

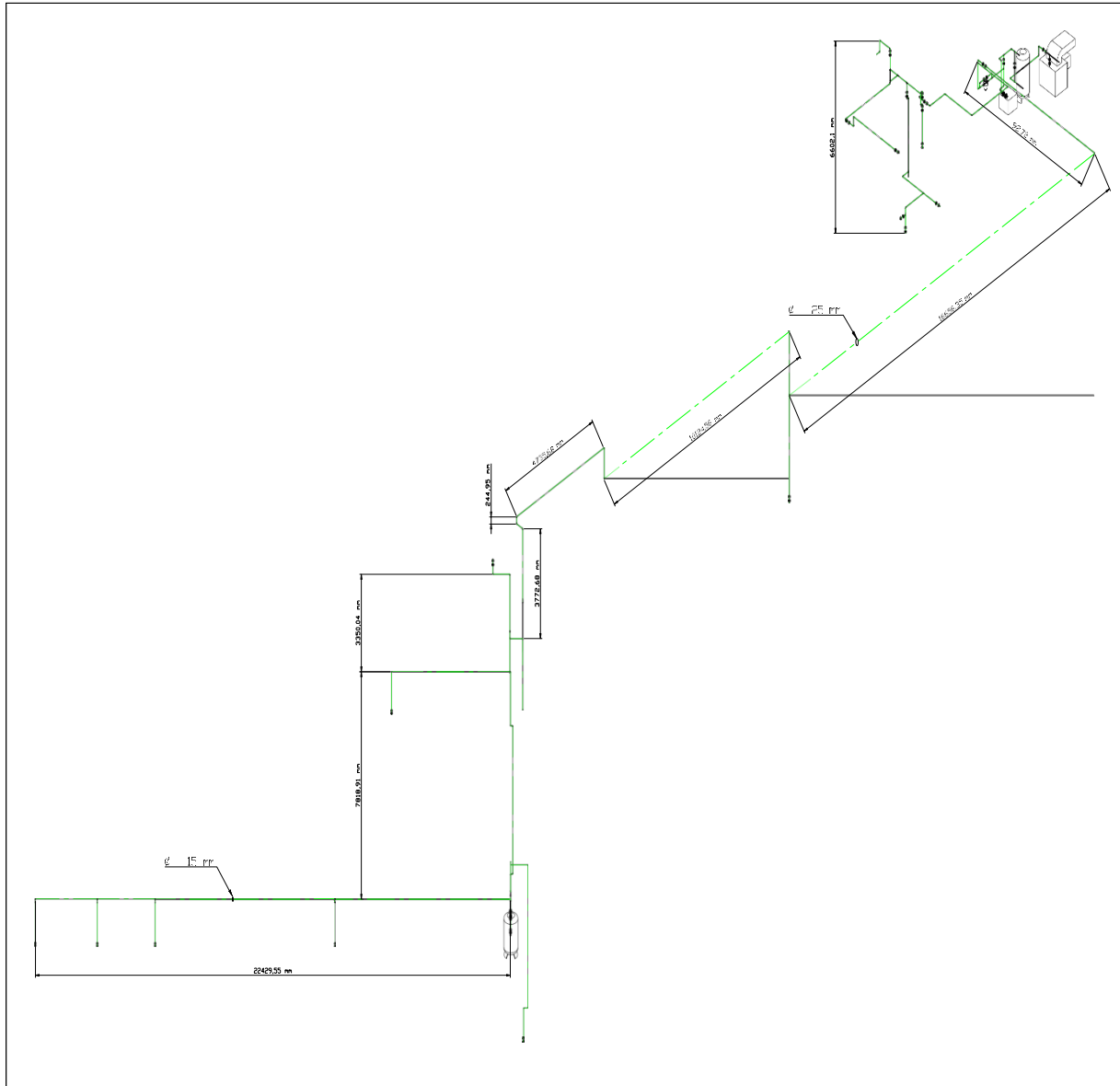
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Anexo c: Isométrico 3d de la red actual de aire comprimido grupo MAPEI**



**(detalle de las conexiones cerca al compresor)**

**Anexo D: Plano completo de la red actual de aire comprimido**






FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

FIRMA ASESOR



\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Informe final de trabajo de grado  
aprobado

FECHA ENTREGA: 2024-06-12 7:00 pm