



Universidad
Industrial de
Santander

**ANÁLISIS TECNICO-ECONOMICO PARA LA OPTIMIZACION DE LA RED DE
AIRE COMPRIMIDO DE LAS AREAS DE MOLIENDA DE CEMENTO Y
EMPAQUE EN LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA**

JEFFERSON DAMIAN PRADA CALDERON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA
BUCARAMANGA**

2016

**ANÁLISIS TECNICO-ECONOMICO PARA LA OPTIMIZACION DE LA RED DE
AIRE COMPRIMIDO DE LAS AREAS DE MOLIENDA DE CEMENTO Y
EMPAQUE EN LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA**

JEFFERSON DAMIAN PRADA CALDERON

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

JAVIER RUGELES PEREZ

Ingeniero Mecánico

Co - Director

IVAN ESPINOSA ACEVEDO

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

*A Dios, por darme el regalo de realizar este proyecto en una gran empresa
y la fortaleza para terminarlo.*

*A mis padres, William y Olga por su amor, apoyo en cada momento de mi
vida y sobre todo por creer en mí.*

*A mi novia Treisy, por tantos años de amor incondicional, momentos felices
y paciencia.*

*A mis amigos y compañeros de la escuela de Ingeniería Mecánica por
brindarme su amistad y haber hecho esta etapa de la universidad
inolvidable.*

Jefferson

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial y sincera a las personas que de forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

A Javier Rugeles, Ing. Mecánico y Director del proyecto, por su colaboración y acompañamiento a lo largo del desarrollo del proyecto.

A Iván Espinosa, Ing. Mecánico y Co-Director del proyecto, por su acompañamiento y orientación en el desarrollo del presente proyecto.

A Jose Pablo Ramírez, Gerente de Mantenimiento de Planta Caracolito, por su ayuda en la empresa.

A los ingenieros y técnicos de la planta Caracolito por su colaboración profesional.

A Jairo Araque, de la empresa Kaeser Compresores, por toda la colaboración y enseñanzas técnicas aportadas para el proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	13
1. FORMULACION DEL PROBLEMA	14
1.1 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACION DE LA SOLUCION.....	15
1.3 OBJETIVO GENERAL	16
1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
1.5 MARCO CONCEPTUAL.....	18
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 CONCEPTO DE AIRE LIBRE.....	21
2.2 COMPRESORES DE TORNILLOS	22
2.2.1 Compresores de tornillo exentos de aceite.	24
2.2.2 Compresores de tornillo con inyección de líquido.	25
2.3 Disposición de las redes de aire comprimido.....	25
2.3.1 Circuito cerrado..	25
2.3.2 Circuito abierto.....	26
2.4 FACTOR DE UTILIZACIÓN.....	27
2.5 FACTOR DE SIMULTANEIDAD	27
2.6 REQUERIMIENTOS DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO	27
2.6.1 Depósitos de aire..	28
2.6.2 Secadores o deshumidificadores..	29
2.6.3 Psicrometría.	30
2.6.4 Procedimientos de depuración.....	31
2.7 CAÍDA DE PRESIÓN	35
2.8 ENVEJECIMIENTO DE LA TUBERIA	35
2.9 DETECCIÓN DE FUGAS.....	36

2.9.1	Medición de descarga del receptor..	36
2.9.2	Por tiempo de operación del compresor.....	37
2.9.3	Detección y evaluación usando ultrasonido..	37
3.	DIAGNOSTICO DE LA RED ACTUAL	39
3.1	CAPACIDAD INSTALADA ACTUAL DE AIRE COMPRIMIDO.....	39
3.1.1	Cuarto principal de compresores.....	40
3.1.2	Cuarto de compresores del área de empaque.....	42
3.2	Sistema de acumulación de aire comprimido	45
3.3	RED DE DISTRIBUCION DEL AIRE COMPRIMIDO	46
3.4	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS NEUMÁTICOS.....	50
3.4.1	Filtros de manga.....	50
3.4.2	Actuadores Neumáticos.	51
3.4.3	Consumo de los equipos ubicados en las diferentes área.....	51
3.5	EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LOS COMPRESORES.	53
3.6	IDENTIFICACION DE PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA RED DE AIRE COMPRIMIDO.....	56
3.6.1	Humedad excesiva..	56
3.6.2	Mal estado de la tubería y diseños erróneos de la red..	58
3.6.3	Uso inadecuado del aire comprimido.....	60
3.7	IDENTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ACTUALES POR FUGAS DE AIRE COMPRIMIDO.	61
3.8	IDENTIFICACIÓN DE LAS DE LAS PÉRDIDAS ACTUALES DE CARGA....	65
3.9	COSTO DE ENERGIA	66
3.9.1	Calculo del costo debido al funcionamiento de los compresores. .	66
3.9.2	Costo debido a fugas	70
3.10	COSTO DEBIDO A MANTENIMIENTO POR BAJA CALIDAD DE AIRE	72
3.11	DIAGNOSTICO Y EVALUACION DEL DISEÑO ACTUAL	72

4. REDISEÑO Y CÁLCULO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	75
4.1 DETERMINACION DE LA DEMANDA DE AIRE	75
4.2 CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AIRE COMPRIMIDO	81
4.2.1 Análisis psicométrico..	82
4.3 VENTILACIÓN DEL CUARTO DE COMPRESORES	83
4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES DE AIRE COMPRIMIDO.....	86
4.5 DISTRIBUCION DEL AIRE COMPRIMIDO	89
5. ANALISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS PROPUESTAS DE REDISEÑO	97
5.1 COSTOS ACTUALES EN LA RED DE AIRE COMPRIMIDO.....	97
5.2 AHORROS DEBIDO AL DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES PULMON Y CORRECCION DE FUGAS.....	98
5.3 COSTOS CORRECCION DE FUGAS DE AIRE COMPRIMIDO	101
5.4 COSTOS DEL REDISEÑO PROPUESTO.....	101
5.4.1 Tratamiento del aire comprimido..	101
5.4.2 Tanques de aire comprimido.....	103
5.4.3 Costo de tuberías y accesorios..	104
5.4.4 Costo debido a la ventilación de los cuartos de compresores.	109
5.5 ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE MEJORA	110
6. CONCLUSIONES	1122
7. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS.....	1155
BIBLIOGRAFIA	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Entrada Planta Caracolito	19
Figura 2. Elementos y accionamiento de un compresor de tornillos	23
Figura 3. La compresión en un compresor de tornillo	23
Figura 4. Compresor exento de aceite	24
Figura 5. Diagrama de flujo de un compresor con inyección de aceite	25
Figura 6. Red de distribución cerrada	26
Figura 7. Red de distribución abierta	27
Figura 8. Tanque de aire comprimido	29
Figura 9. Refrigerador posterior de agua	32
Figura 10. Refrigerador aire-aire.....	32
Figura 11. Secador frigorífico	33
Figura 12. Secador por adsorción	34
Figura 13. Filtros de polvos y aceites	34
Figura 14. Pistola de Ultrasonido.....	38
Figura 15. Distribución de las salas de compresores en la planta.....	39
Figura 16. Cuarto Principal de Compresores.....	40
Figura 17. Distribución espacial compresores Cuarto Principal	41
Figura 18. Distribución espacial cuarto de compresores empaque	43
Figura 19. Cuarto de Compresores área de empaque.....	43
Figura 20. Equipos tratamiento de aire cuarto compresores Empaque	44
Figura 21. Filtro de manga	50
Figura 22. Empacadora 3 GE 12 PLUS	51
Figura 23. Aire comprimido húmedo en las líneas de consumo en el área de Molienda de Cemento.....	57
Figura 24. Corrosión interna de la tubería	57
Figura 25. Conexión atípica de una línea a la salida de un tanque pulmón.	58
Figura 26. Tubería cubierta con material y corroída área molienda de cemento ...	59

Figura 27. Tubería corroída por el cemento en el área de empaque	60
Figura 28. Reducciones y ampliaciones de diámetro en una misma línea en el área de empaque.....	60
Figura 29. Usos inadecuados del aire comprimido.....	61
Figura 30. Formato control de fugas	63
Figura 31. Pequeñas fugas en los empaques de las válvulas diafragma en el área de molienda de cemento y empaque.	63
Figura 32. Elementos por donde se presentan fugas en el Área de Cemento	64
Figura 33. Elementos por donde se presentan fugas en el Área de Empaque	64
Figura 35. Diagrama de flujo de calor	84
Figura 36. Ventilación forzada.....	84
Figura 37. Ducto extractor de aire caliente cuarto de empaque.....	86
Figura 38. Red de distribución tipo abierta.....	90
Figura 39. Red de distribución tipo cerrada o en anillo	91
Figura 40. Tubería de acero galvanizado.....	92
Figura 41. Tubería de aluminio	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Generación de aire comprimido área de Molienda de Cemento.	41
Tabla 2. Generación de aire comprimido área de Molienda de Cemento.	42
Tabla 3. Generación de aire comprimido área de Empaque.	44
Tabla 4. Características secador Kaeser.	44
Tabla 5. Volumen de los depósitos de los tanques pulmón área Molienda de Cemento.	45
Tabla 6. Volumen de los depósitos de los tanques pulmón área Empaque.	46
Tabla 8. Consumo de aire de los equipos.	52
Tabla 9. Potencia específica compresores molienda cemento.	67
Tabla 10. Potencia específica compresores empaque.	67
Tabla 11. Costo pie cúbico área molienda de cemento.	68
Tabla 12. Costo pie cúbico área empaque.	68
Tabla 13. Costo de generación de aire comprimido en el área de molienda de cemento.	69
Tabla 14. Costo de generación de aire comprimido en el área de empaque.	70
Tabla 15. Costos debido a las fugas.	71
Tabla 16. Consumo filtro de mangas 38414-31202.	78
Tabla 17. Consumo Polimat M-40.	80
Tabla 18. Entrega y consumos de aire comprimido de las áreas.	80
Tabla 19. Costo de generación de aire comprimido en las dos áreas.	97
Tabla 20. Ahorro en el costo de energía por el ciclaje de los compresores.	100
Tabla 21. Costos alternativa con secador refrigerativo.	101
Tabla 22. Costos alternativa con refrigerador y filtro desecante.	102
Tabla 23. Costos filtros separadores de condensados y desoleadores.	102
Tabla 24. Costo del drenaje automático.	102
Tabla 25. Costos tanques aire comprimido.	103
Tabla 26. Costo tubería en acero galvanizado para el área de cemento.	104

Tabla 27. Costo tubería en aluminio para el área de cemento	104
Tabla 28. Costo de accesorios en acero galvanizado para el área de cemento ..	105
Tabla 29. Costo de accesorios en aluminio para el área de cemento	105
Tabla 30. Costo tubería en acero galvanizado para el área de empaque	106
Tabla 31. Costo tubería en aluminio para el área de empaque	106
Tabla 32. Costo de accesorios en acero galvanizado para el área de empaque .	107
Tabla 33. Costo de accesorios en aluminio para el área de empaque	108
Tabla 34. Costo total de la instalación en acero galvanizado para ambas áreas .	109
Tabla 35. Costo total de la instalación en aluminio para ambas áreas	109
Tabla 36. Costos de los extractores de aire para los cuartos de compresores de ambas áreas.....	110
Tabla 37. Análisis costo – beneficio de las diferentes alternativas	111

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS TECNICO-ECONOMICO PARA LA OPTIMIZACION DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LAS AREAS DE MOLIENDA DE CEMENTO Y EMPAQUE EN LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA

AUTOR: JEFFERSON DAMIAN PRADA CALDERON **

PALABRAS CLAVES: Análisis, Optimización, Aire Comprimido, Cemento, Empaque, Cemex

DESCRIPCIÓN: Este trabajo tiene por objetivo presentar un antecedente de análisis, rediseño y propuesta de optimización de redes de aire comprimido, hacia la potencial implementación en la planta Caracolito de Cemex Colombia, contribuyendo al sector productivo del país. Se presenta la ingeniería conceptual para el rediseño e instalación del mismo, utilizando normas internacionales ISO, ASME y ASTM con el fin minimizar los costos de mantenimiento y de operación.

Los sistemas neumáticos es la tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y lograr mover mecanismos. El aire es un gas elástico y, por tanto, al aplicarle una fuerza se comprime, el aire como se encuentra en el ambiente para la industria no es muy utilizado, solo cuando se le comprime y permite devolver la energía acumulada cuando se le permite expandirse generando trabajo. Los sistemas de aire comprimido para su estudio se dividen en 2 campos bien definidos: centrales de producción con su tratamiento y tuberías de distribución; y los equipos receptores que convertirán la energía neumática en trabajo. Si el primer campo no se encuentra bien diseñado provocará problemas en los equipos receptores, por este motivo que la presente memoria pretende profundizar en el estudio de los aspectos de este rediseño.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Mecánico Javier Rugeles Pérez, Codirector: Ing. Mecánico Iván Espinosa Acevedo

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS TECHNICAL-ECONOMIC FOR OPTIMIZATION NETWORK OF COMPRESSED AIR OF AREAS OF CEMENT GRINDING AND PACKING IN THE PLANT CARACOLITO OF CEMEX COLOMBIA *

AUTHOR: JEFFERSON DAMIAN PRADA CALDERON **

KEY WORDS: Analysis, Optimization, Compressed Air, Cement, Packaging, Cemex

DESCRIPCIÓN: This work aims to present an antecedent analysis, redesign and proposed network optimization of compressed air, to the potential implementation in Colombia Caracolito Cemex plant, contributing to the productive sector of the country. Is presented the conceptual engineering for the redesign and installation it, using international standards ISO, ASME and ASTM with a view to minimize the costs of maintenance and operation.

Pneumatic systems is the technology that uses compressed air as mode the transmission of the energy needed to move and make moving mechanisms. Air is an elastic gas and therefore, to apply a force to compress the air as in the environment industry is not widely used, only when it is compressed and can return the stored energy when allowed to expand generating work. Compressed air systems for study are divided into two well-defined fields: production centers with their treatment and distribution pipes; and receiving equipment that will convert the pneumatic energy into work. If the first field is not well designed will cause problems in receiving equipment, for this reason herein it is intended to deepen the study of the aspects of this redesign.

*Degree Work

** Physic Mechanical Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering Director: Mechanical Engineer Javier Rugeles Pérez, Codirector: Mechanical Engineer Iván Espinosa Acevedo

INTRODUCCION

El presente trabajo titulado “ANÁLISIS TECNICO-ECONOMICO PARA LA OPTIMIZACION DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LAS AREAS DE MOLIENDA DE CEMENTO Y EMPAQUE EN LA PLANTA CARACOLITO DE CEMEX COLOMBIA” tiene como objetivo desarrollar una propuesta de optimización de la red de aire comprimido, identificando las fallas que se vienen presentando en la red de distribución, como fugas y mala calidad del aire, que generan mayores costos energéticos y de mantenimiento.

El análisis técnico – económico para la optimización de la red de aire comprimido pretende mejorar la eficiencia por medio de la disminución del consumo de aire identificando y corrigiendo las fugas, dimensionando la red de tubería y los tanques de aire disminuyendo el ciclo de trabajo de los compresores, y así, lograr reducir de esta manera los costos del consumo eléctrico y así bajar los costos operacionales y de mantenimiento.

Con este proyecto se pretende mostrar diferentes alternativas de mejora y con ello los beneficios que cada una tiene para el mejoramiento de la red de aire comprimido y garantizar la confiabilidad y disponibilidad del servicio de aire comprimido cumpliendo con las condiciones del proceso.

1. FORMULACION DEL PROBLEMA

La empresa Cemex, planta Caracolito en su proceso de producción, transformación y embalaje de cemento hace uso del aire comprimido, en aplicaciones como filtros de mangas, sistemas de accionamiento neumático y cañones de aire usados para limpieza de costras en torre precalentadora, entre otros. El aire comprimido es una muy buen fuente de energía, de fácil transporte y almacenamiento, pero su producción es muy costosa, por ello es indispensable tener un sistema energéticamente más eficiente.

El aire comprimido producido en las dos salas de compresores es utilizado principalmente para el funcionamiento neumático de las máquinas empacadoras (3 de las 4 en funcionamiento) y paletizadoras, para el golpeteo de los filtros de mangas y diversos actuadores neumáticos, y otros usos inadecuados, como limpieza para el personal, enfriamiento de motores y fluidificación de aerodeslizadores.

Los principales problemas que presenta la planta son:

- La gran cantidad de fugas en las redes secundarias de distribución lo que conlleva a que los compresores realicen un trabajo extra para cumplir con la demanda de aire, lo que se traduce en un aumento en el consumo de energía y un desgaste adicional interno de los equipos.
- Se presentan caídas de presión considerables que provocan que equipos como los filtros de mangas no cuente con la suficiente presión de disparo y no cumpla con su función de sacudir las mangas.
- La capacidad de los depósitos pulmón del sistema, insuficiente para la actual demanda de aire, junto con una pobre regulación de los compresores, ha aumentado los arranques por hora y los tiempos de funcionamiento de los compresores, excediéndose los valores máximos recomendados por los fabricantes.

- La baja calidad del aire suministrado. Al no tener el aire comprimido la calidad requerida se generan daños prematuros y paros de equipos generando pérdidas de producción. En el sector donde se encuentra la planta la humedad relativa es bastante alta, si no se tiene un buen sistema de purga y secado del aire provocaría corrosión en los actuadores neumáticos y afectaría procesos importantes en la producción y despacho del cemento.
- Los tanques pulmón cuentan con drenaje temporizado, los cuales no están muy bien sincronizados y no son muy eficientes ya que descargan cada cierto tiempo y durante intervalos fijos, durante ese tiempo además de drenar agua, también se pierde gran cantidad de aire comprimido utilizable en los procesos.

1.1 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Mediante la realización de este proyecto se plantea un análisis energético y una propuesta de optimización de la red de aire comprimido de la Planta Caracolito de Cemex Colombia para las áreas de cemento y empaque, haciéndola más eficiente energéticamente y mejorando la calidad del aire que suministra. Adicionalmente se propondrán los cambios requeridos, para tener un sistema más robusto y confiable, que ante cualquier eventualidad pueda mantener estable el suministro de aire comprimido.

1.2 JUSTIFICACION DE LA SOLUCION

En este proyecto de grado se desea optimizar la red de aire comprimido de las áreas de molienda de cemento y empaque de la planta Caracolito para la empresa CEMEX Colombia, de acuerdo a las condiciones de operación requeridas por el proceso.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de atender las necesidades del sector productivo del país, desarrollando una propuesta de optimización de la red de aire comprimido para las áreas de molienda cemento y empaque para la planta Caracolito de CEMEX Colombia, a través de un análisis técnico-económico de los equipos asociados a la red de aire comprimido, rediseñando el sistema con el fin de minimizar el consumo energético, costos de mantenimiento y mejorar la calidad del aire comprimido a suministrar.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Elaboración de los diagramas de flujo del sistema de aire comprimido que permitan conocer la localización de:

- ✓ Los compresores, con información de sus modelos y número de identificación.
- ✓ Los equipos periféricos de acondicionamiento del aire (post enfriadores, secadores, separadores de agua, filtros, válvulas).
- ✓ Los tanques pulmón del sistema.
- ✓ Las redes de tuberías, con información de longitudes y diámetros de la misma.
- ✓ Los equipos usuarios del aire.

Para la realización de los diagramas de flujo se utilizara el programa AutoCAD.

2. Analizar la información recopilada sobre:

- ✓ Los consumos actuales de los equipos asociados a la red.
- ✓ Análisis de la red actual de aire comprimido
- ✓ Información técnica de los compresores instalados.
- ✓ Calidad del aire.
- ✓ Análisis de los diferentes equipos y componentes de la red.

- ✓ Costos de producción de aire comprimido.
- 3. Identificar y cuantificar las fugas presentes en la red de aire comprimido con el propósito de encontrar puntos de oportunidad y el costo de energía asociado a estas fugas.
- 4. Optimizar el sistema de distribución de aire comprimido bajo los estándares de calidad y operación requeridos por CEMEX teniendo en cuenta las siguientes especificaciones:
 - ✓ Calidad del aire según norma ISO 8573-1 (2010), clase 2 para partículas sólidas y cantidad de aceite y clase 4 para cantidad de agua, recomendada para aplicaciones como actuadores y máquinas neumáticas, aire de control de instrumentos y empacadoras.
 - ✓ Máxima caída de presión de 1,5 % de la presión de trabajo.
 - ✓ Máxima pérdida de caudal por fugas de 10%
 - ✓ Garantizar la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad de la nueva red de aire comprimido que cumpla con las condiciones de proceso y la mejor relación costo – beneficio.

Las alternativas de mejoras a evaluar en este proyecto son:

En el área de producción del aire:

- ✓ Instalación de nuevos equipos
- ✓ Ajuste de los niveles de presión de carga y descarga.
- ✓ Cambios en la capacidad de los tanques de almacenamiento de aire.

En las líneas de distribución

- ✓ Reducción de fugas de aire.
- ✓ Reemplazo de tramos de tubería por líneas nuevas o de mayor diámetro.

En puntos de uso final.

- ✓ Ajustes de presión.

✓ Uso de equipos más eficientes.

5. Realizar el análisis de flujo de caja estimando los costos de inversión asociados a la implementación del proyecto de optimización del sistema de aire comprimido, y la reducción en los costos asociados con la operación del sistema, para determinar la tasa interna de retorno.

1.5 MARCO CONCEPTUAL

CEMEX es una compañía global de soluciones para la industria de la construcción, que ofrece productos y servicio a clientes en más de 50 países en el mundo. La compañía mexicana ocupa el tercer lugar mundial en ventas de cemento y Clinker, con una capacidad de producción de 97 millones de toneladas al año y es la principal empresa productora de concreto premezclado, con una capacidad de producción de aproximadamente 77 millones de toneladas anuales.

Los datos principales de la empresa son:

Nombre: Cementos Mexicanos. S.A.B. de C.V.

Dirección: Km 3,5 Vía Buenos Aires - Payandé

Ubicación: Planta Caracolito Ibagué – Colombia

Temperatura ambiente: 35°C

Humedad relativa: 70%

Presión atmosférica: 95 kPa

Figura 1. Entrada Planta Caracolito



Fue fundada en 1906 en México y gracias a su gestión visionaria, durante el siglo XX se consolidó como una de las empresas líderes en la producción de cementos y concretos en el mundo. CEMEX Colombia forma parte de esta gran familia global desde 1996, con más de 745 empleados que ponen su talento al servicio del progreso del país. Desde el año 1985 se ha consolidado en Cúcuta como una de las empresas líderes en producción de concreto y cemento.

CEMEX inicio operaciones en Colombia en 1996 con la compra de Cementos Samper y Cementos Diamante, convirtiéndose en el segundo mayor productor del sector, y líder de los mercados más dinámicos, como Bogotá. Actualmente consta de 5 plantas cementeras (Tolima, Cundinamarca, y Los Santanderes), obteniendo de ellas una capacidad instalada de 4.8 millones de toneladas por año. La planta Caracolito de Ibagué es una de las más grandes, con una capacidad instalada de 2.8 millones de toneladas de cemento anual. Además tiene operaciones de concreto y agregados. CEMEX es uno de los líderes mundiales de producción de cemento, con presencia en todos los continentes del mundo.

Misión. En CEMEX, nuestra razón de ser se basa en la satisfacción global de las necesidades de construcción de nuestros clientes y crear valor para nuestros accionistas, empleados y otras audiencias claves; consolidándonos como la organización cementera multinacional más eficiente y rentable del mundo.

Visión. Nos esforzamos para la construcción y desarrollo de un mundo mejor para posicionarnos como líder del sector construcción.

Valores Corporativos. Nuestros valores definen el carácter de nuestra compañía. Se encuentran en el corazón mismo de nuestra organización, guían nuestras acciones y reflejan cómo nos relacionamos con nuestros grupos de interés.

- Colaboración: Trabajamos en conjunto y compartimos conocimientos en una búsqueda constante de la excelencia.
- Integridad: Nos comportamos de manera honesta, responsable y respetuosa en todas nuestras interacciones.
- Liderazgo: Vemos a futuro y nos esforzamos para mejorar nuestros servicios y alcanzar una mayor competitividad.

Políticas de Calidad. Satisfacer las necesidades de nuestros clientes, fabricando productos que alcancen los más altos estándares de calidad, a través del mejoramiento continuo con procesos administrativos y operativos controlados, cumpliendo todos los requisitos legales y con la participación de un equipo humano competitivo y capacitado.

2. MARCO TEÓRICO

La compresión del aire se realiza en unidades compresoras, debido a que el aire es fácilmente transportable, se puede llegar por redes de tubería a cualquier punto de la planta e instalar los compresores en cualquier parte de ella. Por ser el aire un fluido compresible es posible almacenarlo en tanques, los cuales regulan la entrada en funcionamiento del compresor presentando un ahorro en el consumo de energía.

Otras características innatas del aire comprimido son:

- Las fugas de aire no son tóxicas ni explosivas
- Los equipos neumáticos no están expuestos a los golpes de ariete como los hidráulicos.
- Tiene gran capacidad de control y regulación
- El aire no presenta riesgo de chispa ni de cargas electrostáticas
- Se puede combinar con otras formas de energía

2.1 CONCEPTO DE AIRE LIBRE

Las cantidades en N l/min o en N m³/min que se muestran en los catálogos de los equipos neumáticos se refiere al aire libre por minuto (aire atmosférico a la presión y temperatura normales). Se debe tener presente que la entrega del compresor también se da en aire libre para que haya concordancia de unidades entre consumo y entrega. Las cantidades de aire entregado en los compresores de desplazamiento positivo, son especificados como volúmenes normales¹, según la norma ISO 1217: 20°C, 1 bar(a) y 0% de humedad relativa. En la práctica, se calcula los volúmenes a condiciones ambientales del sitio de la instalación del compresor. Si se adquiere un compresor basándose en este dato, se encontrará

¹ Kaeser Compresores; *Seminario de Aire Comprimido*; Primera Edición; 2013; p. 273

que la cantidad real de aire suministrado es menor dependiendo de las condiciones ambientales, por eso se debe hacer la conversión a condiciones actuales utilizando la siguiente fórmula²:

$$Q_s = Q_i * \frac{T_s * P_i - P_v}{T_i * P_s} \quad \text{Ecuación 1}$$

Q_s = volumen a condiciones estandar SCFM

Q_i = volumen a condiciones de entrada CFM

T_s = temperatra a condiciones estandar K

T_i = temperatura a condiciones de entrada K

P_i = presión a las condiciones de entrada PSIA

P_v = presión parcial de vapor PSIA

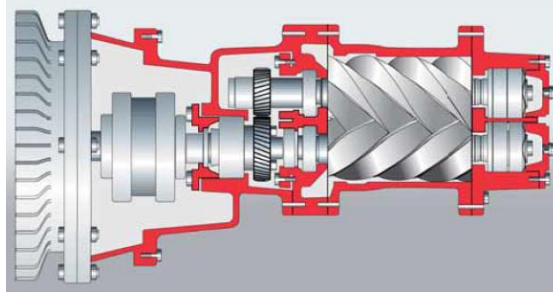
P_s = presión barometrica estandar PSIA

2.2 COMPRESORES DE TORNILLOS

Las piezas principales que constituyen un compresor de tornillo son el rotor macho con la transmisión mecánica el rotor y hembra, que giran en posiciones opuestas mientras disminuye el volumen entre la carcasa y ellos.

² CAGI; *Compressed Air and Gas Handbook*; p. 156

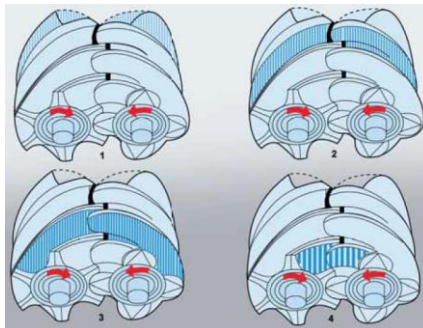
Figura 2. Elementos y accionamiento de un compresor de tornillos



Fuente: Atlas Copco; Manual del Aire Comprimido 2011; Séptima Edición; 2011; p.35

Mientras giran los rotores, los espacios que hay entre los tornillos se van mostrando al orificio de admisión y el incremento de volumen que generan un descenso de presión por lo que estos espacios comienzan a llenarse de aire (1). Cuando los espacios se llenan de aire, la siguiente rotación cierra el orificio de admisión y comienza la compresión (2). El volumen de aire atrapado por los tornillos sigue disminuyéndose (3). Finalmente cuando el aire alcanza la presión final, el espacio entre los tornillos se comunica con el orificio de salida (4).

Figura 3. La compresión en un compresor de tornillo



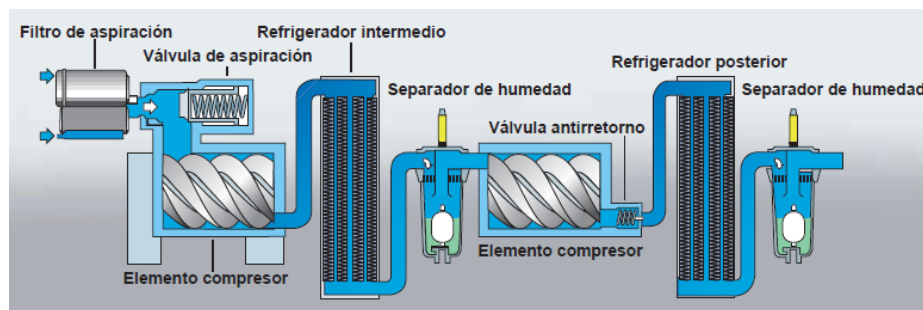
Fuente: Atlas Copco; Manual del Aire Comprimido 2011; Séptima Edición; 2011; p.35

Normalmente el compresor de tornillo no tiene fuerzas mecánicas que ocasionen desequilibrio. La fuerza axial depende de la diferencia de presión entre la entrada y la salida que es absorbida por los rodamientos. Por lo tanto pueden funcionar a mayor velocidad que los demás y resultan apropiados en instalaciones que necesiten gran cantidad de aire comprimido.

Existen dos tipos de compresores de tornillo, los exentos de aceite y los de inyección de líquidos.

2.2.1 Compresores de tornillo exentos de aceite. Los compresores modernos de tornillo exentos de aceite tienen perfiles asimétricos, mejorando un poco su eficiencia energética para reducir las fugas internas. Se utilizan engranajes para sincronizar la posición de los rotores, éstos no tienen contacto entre sí ni con la carcasa entonces no necesitan lubricación dentro de la cámara de compresión, por tal motivo el aire comprimido sale sin aceite. En este tipo de compresor la relación de presiones está ligada a la temperatura de aspiración y descarga, por eso se fabrican de varias etapas y con refrigeración intermedia para lograr mayores presiones.

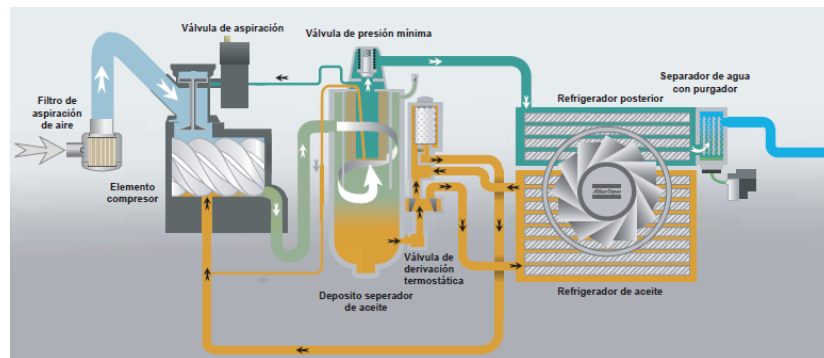
Figura 4. Compresor exento de aceite



Fuente: Atlas Copco; Manual del Aire Comprimido 2011; Séptima Edición; 2011; p.37

2.2.2 Compresores de tornillo con inyección de líquido. Se inyecta el aceite en la cámara de compresión y algunas veces sobre los rodamientos, su función es la de lubricar y enfriar las piezas móviles, enfriar el aire que se comprime y reducir las fugas internas.

Figura 5. Diagrama de flujo de un compresor con inyección de aceite



Fuente: Atlas Copco; Manual del Aire Comprimido 2011; Séptima Edición; 2011; p.37

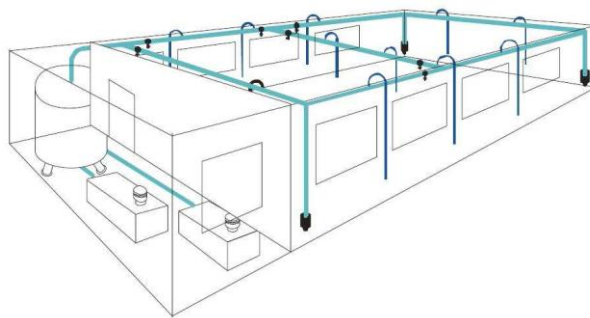
2.3 DISPOSICIÓN DE LAS REDES DE AIRE COMPRIMIDO

Dependiendo de los puntos de consumo, ubicación de máquinas y estructura del edificio se puede adoptar alguna de estos dos tipos de distribución; abierto o cerrado.

2.3.1 Circuito cerrado. Se constituye por una sola línea principal de la cual se desprenden las secundarias y las de servicio. Si el aire lleva a la salida del compresor un equipo de secado total, puede hacerse en circuito cerrado.

Una vez el circuito este lleno de aire, la dirección de flujo no puede ser determinado, ya que estará dada por los consumos mayores que se originen en el circuito. La principal desventaja de este tipo de redes es su mantenimiento, ante una reparación es posible que se detenga el suministro de aire "aguas abajo" del punto de corte lo que implica una detención de la producción.

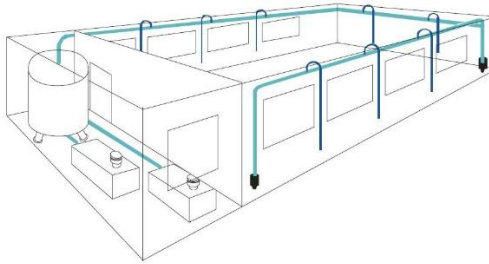
Figura 6. Red de distribución cerrada



Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5025/fichero/2-+Descripci%F3n+aire+comprimido.pdf>

2.3.2 Circuito abierto Se constituye por una sola línea principal de la cual se desprenden las secundarias y las de servicio. Si la instalación no lleva secador de aire a la salida del compresor y solo lleva refrigerador posterior, la red debe diseñarse con cierto ángulo de inclinación para ayudar a la separación de los condensados producidos en la tubería. Se deben colocar separadores de agua en la red y filtros en los puntos de consumo.

Figura 7. Red de distribución abierta



Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5025/fichero/2-+Descripci%F3n+aire+comprimido.pdf>

2.4 FACTOR DE UTILIZACIÓN

Factor de operación intermitente o factor de servicio, el cual indica el tiempo en uso en un tiempo determinado.

2.5 FACTOR DE SIMULTANEIDAD

Valor empírico cuando se usan idénticos consumidores en una instalación de trabajo, como es laborioso determinar el coeficiente de utilización unidad por unidad, se da una cifra global para todo el conjunto de equipos de la planta.

2.6 REQUERIMIENTOS DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO

Es importante que el aire comprimido sea de la calidad apropiada para nuestros equipos. Si los equipos o el producto final toman contacto con aire comprimido contaminado puede provocar altos costos de mantenimiento o altos rechazos de producción. Para lograr la calidad adecuada para el proceso es imprescindible instalar en la red una serie de elementos que deshumidifiquen, filtren y expulsen las impurezas que contiene el aire.

Los equipos que se deben instalar son:

- Depósito de aire
- Secadores o deshumidificadores
- Filtros de partículas y aceites

2.6.1 Depósitos de aire. Cada instalación de aire comprimido incluye uno o más tanques pulmón, el tanque principal debe estar colocado entre el compresor y la red de distribución. Su tamaño está en función de la capacidad del compresor, del sistema de regulación y del patrón de consumo de la red.

La función de los depósitos del aire es:

- Acumular aire comprimido
- Refrigerar el aire, separar los condensados
- Equilibrar las pulsaciones del aire
- Aumentar el tiempo en vacío de compresor

La siguiente formula sirve para dimensionar el volumen del depósito³:

$$V = T * \frac{C * P_a}{P_1 - P_2} \quad \text{Ecuación 2}$$

V = volumen del tanque en m³

T = tiempo en vacío en segundos

C = demanda de aire en m³

P_a = presión atmosférica absoluta en bar

P_1 = presión inicial del tanque en bar

³ CAGI; *Compressed Air and Gas Handbook*; p. 220

P_2 = presión final del tanque en bar

Figura 8. Tanque de aire comprimido



Fuente: http://www.kaeser.com.co/Products_and_Solutions/Compressed-air-treatment/Air-receivers/default.asp

2.6.2 Secadores o deshumidificadores. El aire atmosférico contiene humedad en forma de vapor de agua que puede condensarse en las tuberías de distribución y de servicio sino se trata previamente. Esta proporción de humedad es mayor o menor según las condiciones ambientales del sitio. La capacidad del aire para retener agua está relacionada con la temperatura y la presión, pero principalmente con la temperatura ya que a mayor temperatura el aire es capaz de contener más humedad. El proceso de compresión del aire lleva consigo un aumento de la temperatura del mismo, lo que aumentará la capacidad de contener humedad; humedad que pasara por el compresor y luego por las tuberías de distribución. En la tubería el aire se ira enfriando por convección y radiación hasta igualar la temperatura ambiente que condensará la mayor parte de la humedad.

2.6.3 Psicrometría. Estudios relacionados con la medida del contenido en vapor de agua existente en el aire. Antes de continuar se deben conocer los siguientes conceptos:

2.6.3.1 Humedad absoluta⁴. Es el peso del vapor del agua en kg, que hay en un kilogramo de aire seco.

$$W = 0,625 * \frac{P_v}{P_a} \quad \text{Ecuación 3}$$

W = humedad absoluta en kg de vapor de agua por kg de aire seco

P_v = presión parcial del vapor de agua

P = presión total del sistema en las mismas unidades de P_a

P_a = presión parcial del aire seco

2.6.3.2 Humedad de saturación⁵. Es el máximo peso de vapor de agua que admite un kg de aire seco a presión y temperatura determinada.

$$W_s = 0,625 * \frac{P_v}{P - P_v} \quad \text{Ecuación 4}$$

W_s = humedad de saturación en kg de vapor de agua por kg de aire seco

P_v = presión parcial del vapor de agua a la temperatura considerada

^{4 5} E. Carnicer Royo; *Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones* ; Segunda Edición; 1994; pp.70-71

2.6.3.3 Humedad de relativa⁶. Es la relación entre la humedad absoluta existente y la humedad máxima que el sistema puede contener.

$$W_r = \frac{W}{W_s} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

W_r = humedad relativa

Una humedad relativa del 100% indica que se trata de un ambiente saturado y una humedad del 0% indica que se trata de un ambiente totalmente libre de humedad.

2.6.3.4 Punto de rocío. Es uno de los conceptos más utilizados para indicar el grado de humedad del aire comprimido, determina la temperatura a la cual el aire llega al punto de saturación. Si la temperatura desciende por debajo de ésta temperatura, se producirán condensados.

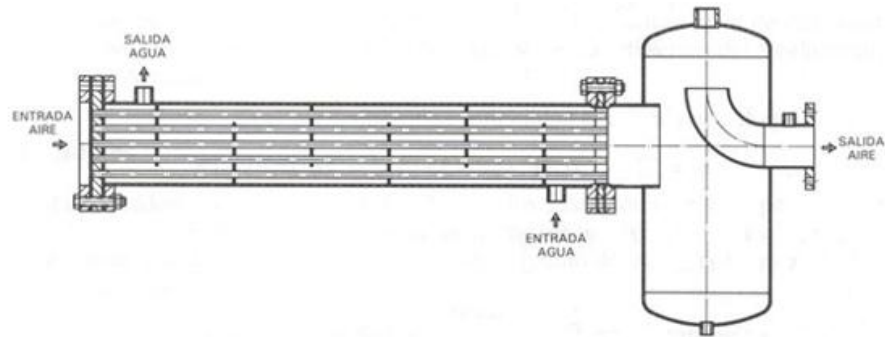
2.6.4 Procedimientos de depuración

2.6.4.1 Tratamiento del aire a la salida del compresor

2.6.4.1.1 Refrigerador posterior de agua: se coloca inmediatamente después del compresor consiguiendo eliminar aproximadamente el 70% – 80% del agua y aceite contenidos en el aire. Reducen la temperatura del aire hasta 25°C.

⁶ E. Carnicer Royo; *Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones* ; Segunda Edición; 1994; p. 79

Figura 9. Refrigerador posterior de agua



Sección de un refrigerador posterior de agua, modelo horizontal, en cuyo interior se aprecia el haz tubular

Fuente: E. Carnicer Royo; *Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones*; Segunda Edición; 1994; p. 137

2.6.4.1.2 Refrigerador posterior de aire: utiliza como elemento refrigerante el aire producido por un grupo motor-ventilador. Se emplean estos equipos cuando el agua es escasa o una opción antieconómica.

Figura 10. Refrigerador aire-aire



Fuente: <http://www.neumairltda.com/tratamiento-de-aire-comprimido/aftercoolers/hankison/air-cooled-aftercoolers.html>

2.6.4.2 Secadores: están diseñados para reducir el contenido de humedad, así si sufren algún enfriamiento hasta el punto de rocío no se presente condensación. Los secadores pueden ser frigoríficos o de adsorción.

2.6.4.2.1 Frigoríficos: reduce la humeada en el aire comprimido por enfriamiento hasta la mínima temperatura funcional posible, cerca de los 3°C. Son de bajo consumo de energía.

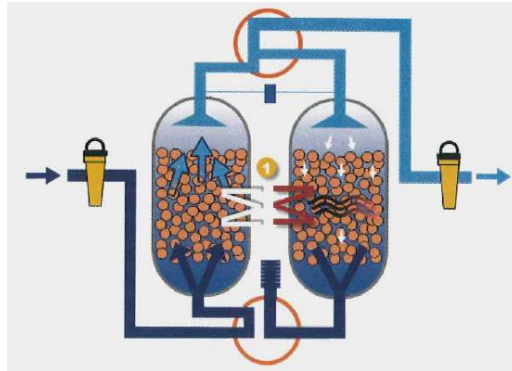
Figura 11. Secador frigorífico



Fuente: Kaeser Compresores; Seminario de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013; p. 102

2.6.4.2.2 Adsorción: efectúan el secado por medio de un adsorbente sólido regenerable, que retiene en un ciclo, la humedad contenida en el aire comprimido, y en el segundo ciclo eliminando esta humedad mediante un ciclo de des adsorción. El punto de rocío que puede obtenerse con estos equipos se encuentra entre 20°C hasta 80°C bajo cero.

Figura 12. Secador por adsorción



Fuente: Kaeser Compresores; Seminario de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013; p. 111

2.6.4.3 Filtros de partículas y aceites. La intención del filtrado es asegurar que el suministro del aire comprimido esté libre de contaminantes como polvo, y aerosoles de aceites. Existen gran cantidad de filtros diferentes para lograr la calidad de aire que se desea. El funcionamiento interno de estos filtros es muy sencillo; el aire entra radialmente a través del medio filtrante, este medio filtrante atrapa las partículas de polvo o aceites y finalmente deja pasar el aire comprimido más limpio.

Figura 13. Filtros de polvos y aceites



Fuente: Kaeser Compresores; Seminario de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013; p. 120

2.7 CAÍDA DE PRESIÓN

La presión obtenida a la salida del compresor no se puede utilizar en su totalidad, ya que la distribución del aire comprimido genera pérdidas por el rozamiento interno con la tubería. Además los accesorios presentes en la red generan cambios de dirección y estrangulamiento caídas de presión. La caída de presión por accesorios se puede calcular como una longitud equivalente en metros a dicha caída de presión (Ver anexo A).

La caída de presión se calculó por medio de la siguiente ecuación empírica tomando base ecuaciones presentadas por los fabricantes Kaeser y Atlas Copco.

$$\Delta P = 98698 * f * \frac{V^2 * L_{eq}}{D^5 * P} \quad \text{Ecuación 6}$$

f = factor de fricción de Swamee

V^2 = caudal de aire en $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

L_{eq} = longitud de la tubería mas accesorios en m

D^5 = diametro interno de la tubería en m

P = presión del sistema en Pa

2.8 ENVEJECIMIENTO DE LA TUBERIA

Cada material tiene una rugosidad característica propia, cuyo valor forma parte de la descripción técnica de la tubería. De otro lado debe tenerse presente que la rugosidad cambia con el tiempo. Después de varios años de uso de una tubería es más rugosa de lo que era inicialmente⁷.

⁷ Rocha Felices Arturo; *Hidráulica de Tuberías y Canales*; Artículo de Internet; p. 138

El fenómeno del cambio de la rugosidad tiene dos aspectos básicos: aumento de la rugosidad y disminución del diámetro útil, lo que significa una baja en el caudal transportado. La ecuación descrita por Colebrook y White supone que la rugosidad se incrementa linealmente con el tiempo así:

$$K_t = K_0 + \alpha_1 t \quad \text{Ecuación 7}$$

K_t = rugosidad después de transcurrido el tiempo

K_0 = rugosidad inicial

α_1 = coeficiente de aumento de la rugosidad

2.9 DETECCIÓN DE FUGAS

Un aspecto negativo de la distribución del aire es la fuga que puede ocurrir en cualquier parte de la red. Los acoplamientos neumáticos son particularmente susceptibles a las fugas, pero también pueden ocurrir en mangueras defectuosas y válvulas de cierre. Las fugas incrementan el costo de la generación de aire comprimido y reducen el rendimiento de los consumidores.

Existen 3 métodos para establecer el porcentaje de fugas de un sistema de aire comprimido.

2.9.1 Medición de descarga del receptor. Un requisito previo es saber el volumen del tanque de aire. El tanque se carga con una presión inicial, luego se mide el tiempo que demora la presión para llegar a una presión menor. Éste método de medición se utiliza cuando el volumen de la red de distribución es menor del 10% del volumen del tanque de aire.

2.9.2 Por tiempo de operación del compresor. Para la medición de fugas por este método, la línea de distribución o la sección que se va a estudiar se debe poder aislar y el compresor solo debe trabajar en esa sección y deberá tener un caudal de entrega mayor al porcentaje de fuga en dicha sección; los consumidores deberán estar desactivados.

El compresor llena de aire la red de prueba, en situaciones normales, ésta presión se mantiene si la red está libre de fugas, pero si la red pierde presión, el compresor arranca. Se puede configurar el arranque del compresor cuando la presión cae por debajo de cierto valor. Dos cronómetros se utilizan en esta medición, uno para medir el tiempo total de la medición, y otro para medir los tiempos de trabajo del compresor.

2.9.3 Detección y evaluación usando ultrasonido. Una parte del aire comprimido que se escapa a través de fugas emite ruido en la región ultrasónica del espectro de sonido. Esta región de ultrasonido puede ser detectada y medida por dispositivos diseñados específicamente y su intensidad se puede mostrar numéricamente y/o gráficamente. Las fugas se pueden escuchar por un auricular conectado al equipo, el equipo anula automáticamente cualquier otro sonido que no se encuentre dentro del espectro de frecuencia de la fuga.

El dispositivo arroja el valor en decibeles, luego se recurre a una tabla entregada por el fabricante en donde se concatena la presión de trabajo junto al dato de los decibeles y arroja el valor aproximado en NCFM correspondiente al caudal de pérdida por la fuga.

Figura 14. Pistola de Ultrasonido



Fuente:<http://www.uesystems.eu/wp-content/themes/html5/img/our-instruments/up-9000/2.jpg>

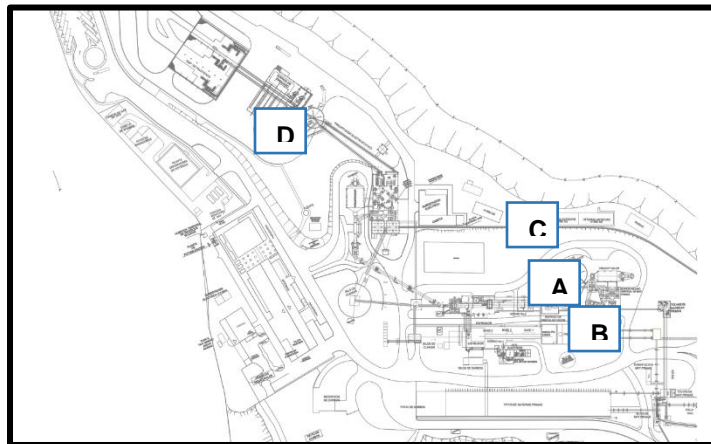
3. DIAGNOSTICO DE LA RED ACTUAL

3.1 CAPACIDAD INSTALADA ACTUAL DE AIRE COMPRIMIDO.

El sistema de aire comprimido de la empresa Cemex – Planta Caracolito está conformado por 4 salas de compresores, las cuales están distribuidas de la siguiente forma:

- Sala de compresores para el suministro de aire al Filtro Redecam Línea 2 (A)
- Sala de compresores para el suministro de aire a los Filtros Redecam y Scheuch Línea 1 (B)
- Cuarto Principal de Compresores (C)
- Cuarto de Compresores del área de Empaque (D)

Figura 15. Distribución de las salas de compresores en la planta



Estas salas son las encargadas de generar la energía neumática a las diferentes áreas de la planta. Cada cuarto cuenta con su red de distribución; conformada por

tuberías y accesorios de diferentes diámetros, que conducen el aire comprimido hasta las diferentes secciones de las áreas.

Además la planta cuenta con tres (3) compresores descentralizados, es decir, no se encuentran en ninguno de los cuartos nombrados anteriormente, repartidos en las áreas de Cemento, Clinkerización y Molienda de Carbón

Para este proyecto solo será motivo de estudio el Cuarto Principal de Compresores que suministra el aire comprimido para el área de Cemento y el cuarto de Compresores del área de Empaque.

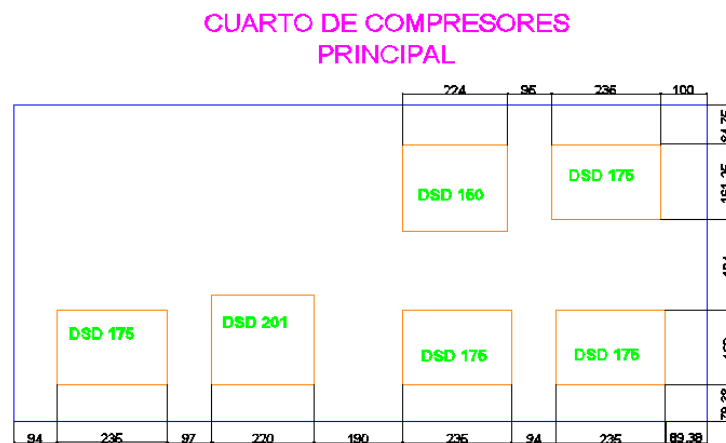
3.1.1 Cuarto principal de compresores. El Cuarto Principal de Compresores, está provisto de cinco (4) compresores DSD 175, un (1) DSD 150 y un (1) DSD 201 del tipo de tornillo lubricados de una sola etapa de compresión marca Kaeser. Los compresores fueron adquiridos por la empresa hace 5 años, vienen provistos de monitores donde se puede observar sus parámetros de funcionamiento y alarmas. El sistema de regulación de los compresores DSD funciona bajo el principio de carga – descarga – parada, programado por un sistema de control maestro SAM (System Air Manager) fabricado por Kaeser.

Figura 16. Cuarto Principal de Compresores



Los compresores del número uno (1) al número cinco (5), se encargan de mantener la presión en las línea de distribución que alimentan las áreas de Materias Primas, Molienda de Crudo, Clinkerización y Molienda de Carbón. Los compresores 3, 4 y 5 están conectados por una tubería con el compresor número seis (6), encargado del suministro de aire al área de Cemento.

Figura 17. Distribución espacial compresores Cuarto Principal



Las características de estos equipos se encuentran resumidas en la tabla 1.

Tabla 1. Generación de aire comprimido área de Molienda de Cemento.

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO							
MOLIENDA DE CEMENTO							
ITEM	MARCA	MODELO	NCFM	PRESION MAXIMA COMPRESOR (psi)	POTENCIA NOMINAL (hp)	REFRIGERACION	CONTROL
1	KAESER	DSD 175	851	110	175	AIRE	CARGA-DESCARGA
2	KAESER	DSD 201	777	1000	150	AIRE	CARGA-DESCARGA

El aire comprimido que se genera en esta sala, sale directamente hacia los respectivos tanques pulmón sin ningún tipo de tratamiento.

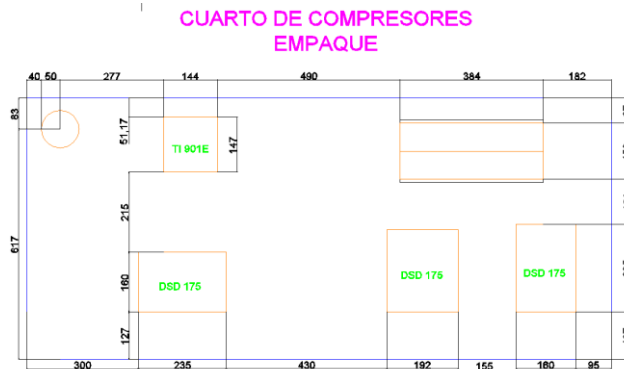
En el área de Cemento se encuentra un compresor descentralizado pequeño, un Sullair ES-8, también de tipo de tornillo lubricado de una etapa de compresión y funciona bajo el principio de carga – descarga – parada. Éste equipo se encuentra en el punto más alejado del área, al lado del filtro de magas de barrido del Molino de Cemento 2, y su función es servir de apoyo a los compresores del cuarto principal, ya que éste filtro venía presentando problemas de funcionamiento debido a la baja presión con que se alimentaba. Las características de este equipo se encuentran resumidas en la tabla 2.

Tabla 2. Generación de aire comprimido área de Molienda de Cemento.

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO							
MOLIENDA DE CEMENTO							
ITEM	MARCA	MODELO	NCFM	PRESION MAXIMA COMPRESOR (psi)	POTENCIA NOMINAL (hp)	REFRIGERACION	CONTROL
1	SULLAIR	ES-8	55	175	20	AIRE	CARGA-DESCARGA

3.1.2 Cuarto de compresores del área de empaque. El cuarto de compresores del área de empaque, está provisto por dos (2) compresores DSD 175 y un (1) DSD 150 del tipo de tornillo lubricados de una sola etapa de compresión marca Kaeser. Al igual que los compresores del Cuarto Principal fueron adquiridos hace 5 años, están provistos con la misma tecnología y funcionan también bajo el mismo principio de carga – descarga – parada. Éste cuarto no está enlazado con un control maestro.

Figura 18. Distribución espacial cuarto de compresores empaque

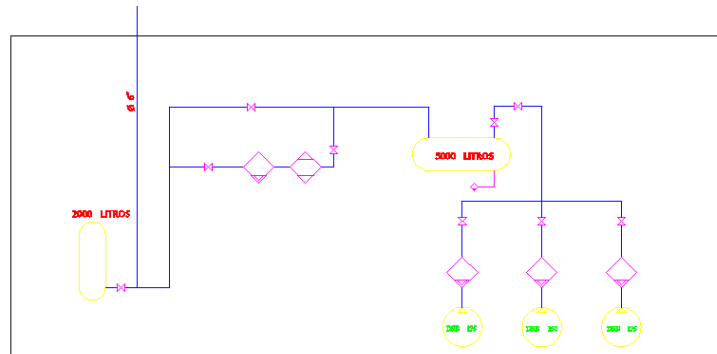


En este cuarto se cuenta con una estación de acondicionamiento, encargada de deshumidificar y filtrar el aire comprimido. Cada compresor en la descarga cuenta con un filtro separador de condensados marca Kaeser KLS 780. El aire entregado por los tres compresores se almacena en el tanque pulmón húmedo desde donde sale para ser deshumidificado a través de un secador frigorífico marca Kaeser TI 901E, luego pasa a través de un filtro separador de aceites o desoleador marca Kaeser KOR 3125P y se almacena en el tanque pulmón seco para su posterior utilización en los equipos de empaque y paletizado.

Figura 19. Cuarto de Compresores área de empaque



Figura 20. Equipos tratamiento de aire cuarto compresores Empaque



Las características de los compresores y del secador se encuentran resumidas en la tabla 3 y 4.

Tabla 3. Generación de aire comprimido área de Empaque.

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO							
EMPAQUE							
ITEM	MARCA	MODELO	NCFM	PRESION MAXIMA COMPRESOR (psi)	POTENCIA NOMINAL (hp)	REFRIGERACION	CONTROL
1	KAESER	DSD 175	851	110	175	AIRE	CARGA-DESCARGA
2	KAESER	DSD 150	883	110	150	AIRE	CARGA-DESCARGA
3	KAESER	DSD 175	851	110	175	AIRE	CARGA-DESCARGA

Tabla 4. Características secador Kaeser.

MODELO	TI901E	
CAUDAL T(SCFM)	@38°F	3000
	@50°F	3900
CAIDA DE PRESION	bar	0,23
	psi	3,3
POTENCIA(KW)	16,92	
DIMENSIONES(mm)	ANCHO	1447,8
	PROF	1524
	ALTO	2111,37
PESO(lb)	2500	

3.2 SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

El aire comprimido suministrado por los compresores se acumula en tanques a presión, ubicados entre el compresor y la red de distribución. Este sistema de acumulación de aire comprimido tiene como funciones principales amortiguar las pulsaciones de caudal de aire a la salida de los compresores, entregar el aire comprimido durante picos de demanda, y contribuir al enfriamiento del aire y posterior separación del condensado.

El área de cemento cuenta con un tanque pulmón principal de 3000 litros ubicado en el nivel cero del edificio, además están instalados 4 tanques más pequeños distribuidos en esta área. (Ver anexo B). Las características de los acumuladores se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Volumen de los depósitos de los tanques pulmón área Molienda de Cemento.

ITEM	DESIGNACION	CAPACIDAD (L)
1	PULMON – SUBESTACION CEMENTO	3000
2	PULMON - SULLAIR ES-8	1000
3	PULMON- NIVEL DESCARGA FILTROS MOL 1	1000
4	PULMON - NIVEL ROLLER PRESS	1000
5	PULMON - NIVEL BANDAS 09-10	500
	TOTAL	6500

En el área de empaque, en el cuarto de compresores se encuentra el tanque pulmón principal húmedo de 5000 litros que está conectado con las salidas de los tres (3) compresores. Después del proceso de des humidificación se conecta con el tanque pulmón seco de 2000 litros. Además, en diferentes puntos del edificio

hay 9 depósitos de aire comprimido (Ver anexo C). Las características de los acumuladores se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Volumen de los depósitos de los tanques pulmón área Empaque.

ITEM	DESIGNACION	CAPACIDAD (L)
1	PULMON CUARTO COMPRESORES	5000
2	PULMON - SALIDA SECADOR TI901E	2000
3	PULMON- NIVEL CERO EMPACADORAS	500
4	PULMON - NIVEL SUPERIOR SILO MOELLER	500
5	PULMON - NIVEL BIG-BAGS	900
6	PULMON - FILTROS DESCARGA BANDA TUBULAR	150
7	PULMON – EMPACADORA 2	500
8	PULMON – EMPACADORA 3	500
9	PULMON – EMPACADORA 4	500
10	PULMON – POLIMAT 2 Y 3	500
	TOTAL	11050

3.3 RED DE DISTRIBUCION DEL AIRE COMPRIMIDO

La empresa no cuenta con planos ni diagramas de flujo de la red de aire comprimido por lo que en esta etapa fue necesario realizar dichos diagramas detallando los accesorios presentes en la red, con el fin de tener una idea general de cómo está distribuida la red de aire comprimido y distinguir con más detalle cada uno de los equipos usuarios del aire comprimido en la red de las áreas de Molienda de cemento y Empaque

A partir de este diagrama se determinó que la red de aire comprimido del área de Molienda de Cemento es de tipo abierta, compuesta por dos redes de distribución que se originan a la salida del tanque pulmón principal ubicado en el nivel cero de

los molinos de cemento, de éstas dos (2) líneas de distribución se desprenden las demás líneas de servicio para alimentar los equipos usuarios del aire comprimido, tal como se puede observar en el diagrama.

La línea N°1 (Ver Anexo D) de distribución principal está compuesta por tubería y accesorios de acero galvanizado de 3" cédula 40 de tipo soldable, trabaja en un circuito de distribución abierto. Ésta línea suministra aire a dos tanques pulmón ubicados en el nivel del Molino Roller Press y debajo de la descarga del Filtro del Molino de Cemento 1. El tanque pulmón del nivel de Roller Press, distribuye aire por medio de tuberías de servicio o ramales a los siguientes equipos:

- Separador del Molino de Cemento 3
- Bandas dosificadoras
- Tolva auxiliar silo 60.000
- Desempolvado draga 57401
- Actuadores de la alimentación al Molino Roller Press
- Tanque pulmón ubicado en la zona de las bandas 38509-38510.

El tanque pulmón ubicado en el nivel de la descarga del Filtro del Molino de Cemento 1, distribuye aire a los siguientes equipos:

- Cola banda tubular 1 63101-41301
- Molino de Cemento 1, 2 y 3
- Separador del Molino de Cemento 1 y 2
- Elevador del Molino de Cemento 1, 2 y 3
- Bujes de salida de los Molinos de Cemento 1 y 2, al acople neumático del Molino de Cemento 3 y a diferentes líneas de puntos de consumo.

La distribución del aire comprimido desde estos tanques a los equipos neumáticos se realiza a través de tuberías de servicio o ramales que presentan reducciones,

a tramos de tubería y accesorios de acero galvanizado de 1", 3/4" y 1/2" cédula 40 de tipo roscable.

La línea N°2 (Ver Anexo E) de distribución principal está compuesta por tubería y accesorios de acero galvanizado de 2 1/2" cédula 40 de tipo soldable, trabaja en un circuito de distribución abierto. Ésta línea principal conecta con la tubería proveniente de Empaque y ambas distribuyen el aire comprimido por medio de tuberías de servicio o ramales a los siguientes equipos:

- Descarga draga 57401
- Descarga banda tubular 38508 y banda 38511
- Alimentación banda tubular 2 63101-41302
- Transporte de finos silo 60.000
- Bujes del lado de la alimentación de los Molinos de Cemento 1 y 2.
- Opacímetros de la chimenea del electrofiltro.
- Filtros descarga bandas tubulares 1 y 2

Según el diagrama de flujo del área de Empaque se determinó que la red de aire comprimido es de tipo abierta, compuesta por una red principal que se origina a la salida del secador Kaeser TI901E y termina en un tanque distribuidor de aire comprimido ubicado en el nivel cero de las empacadoras, desde éste tanque, tres (3) tuberías secundarias o de distribución alimentan los diferentes equipos neumáticos.

La línea secundaria 1 (Ver Anexo F) está compuesta por tubería de acero galvanizado de 3" cédula 40 de tipo soldable, ésta línea distribuye aire comprimido a los siguientes equipos:

- Toda la línea de las empacadoras 1 y 2
- Caricamat 1 y 2
- Paletizadora (Polimat) 1
- Filtros y cargue por Big Bag's

- Actuadores neumáticos parte interna silo Möller
- Actuadores parte superior silo Möller y filtro parte superior silo 6

La línea secundaria N°2 (Ver Anexo G) está compuesta por tubería de acero galvanizado de 3" cédula 40 de tipo soldable, ésta línea llega a un tanque pulmón ubicado en el nivel cero de las empacadoras y distribuye aire comprimido a los siguientes equipos:

- Toda la línea de las empacadoras 3 y 4
- Paletizadora (Polimat) 2 y 3
- Actuadores neumáticos parte interna silo 6

Las tuberías de servicio que alimentan a los equipos en ambas áreas son tuberías y accesorios de acero galvanizado de diámetros 1 1/2", 1", 3/4" y 1/2", cédula 40 de tipo roscable.

En las inspecciones de campo, se encontró que del área de empaque sale una tubería de 3" hacia el área de cemento, con capacidad de proporcionar aire comprimido a una cantidad de equipos considerables, y varios filtros de mangas pequeños. Esta línea se habilito en su tiempo para ayudar a mantener la presión en ambas áreas, pero se deshabilito por presentarse los siguientes problemas:

- El área de empaque era afectada por una caída de presión fuera de lo permitido, provocando el mal funcionamiento de los equipos, especialmente de las empacadoras.
- Al estar conectadas los dos sitios y por no tener el área de cemento un sistema de deshumidificación del aire, se evidencio la presencia de condensados en los actuadores del silo 6 del área de empaque.

Por estas razones se decidió independizar las dos áreas y darle prioridad al área de Empaque, donde se presenta más problemas con las variaciones en el suministro del aire comprimido.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS NEUMÁTICOS

A través de los manuales de los equipos neumáticos y de los ingenieros de mantenimiento se obtuvo la siguiente información general acerca de las características de los requerimientos del aire comprimido. En las dos áreas los equipos que más consumen aire comprimido son los filtros de mangas de los cuales los que hay en mayor cantidad y de mayor tamaño se encuentran en el área de Molienda de Cemento; los otros equipos son actuadores neumáticos tanto lineales como de giro, y a diferencia de los filtros; éstos son más utilizados en el área de Empaque en las máquinas empacadoras y paletizadoras.

La mayoría de los equipos se encuentran en buen estado, algunos de ellos han salido de operación por diferentes motivos: se han inhabilitado rutas de producción, porque se hace innecesario su uso, se les han quitado piezas para otros equipos, o se encuentran deteriorados.

3.4.1 Filtros de manga. El aire comprimido que se le suministra a éstos equipos debe tener una presión entre 80 a 90 psi (g), además debe estar seco y limpio para evitar deterioro prematuro del equipo y mejor rendimiento.

Figura 21. Filtro de manga



3.4.2 Actuadores Neumáticos. El aire comprimido que se le suministra a éstos equipos debe tener una presión entre 85 a 90 psi (g), además debe estar seco, limpio y lubricado para evitar deterioro prematuro del equipo y mejor rendimiento.

Figura 22. Empacadora 3 GE 12 PLUS



3.4.3 Consumo de los equipos ubicados en las diferentes áreas. El mayor consumo de aire comprimido se presenta en las empacadoras, paletizadoras y filtros de mangas. El área de empaque cuenta con 3 paletizadoras, todas en funcionamiento; 4 empacadoras de las cuales 1 está fuera de servicio y entre las 2 áreas hay 32 filtros de los cuales 6 son filtros de proceso, 7 se encuentran fuera de servicio y el resto son de control ambiental. El consumo diario de equipos con poca utilización, no aparecen en la tabla 8, y serán incluidos como un porcentaje (5%) del caudal de diseño en los cálculos de las necesidades de aire comprimido.

Tabla 7. Consumo de aire de los equipos

CONSUMOS DE AIRE COMPRIMIDO		
MOLIENDA DE CEMENTO		
EQUIPO	PUNTO DE CONTROL	CAUDAL (CFM)
FILTRO DE MANGAS 57408	DESEMPOLVADO DRAGA CLINKER A CEMENTO	24,19
FILTRO DE MANGAS 38414	DESEMPOLVADO BANDA PATIO DE ADICIONES	21,99
FILTRO DE MANGAS 57405	DESEMPOLVADO TOLVA AUXILIAR DRAGA CEMENTO	
FILTRO DE MANGAS 57408	DESEMPOLVADO TRANSPORTE FINOS SILO 60.000	
FILTRO DE MANGAS 57418	DESEMPOLVADO TRANSPORTE FINOS SILO 60.000	
FILTRO DE MANGAS 57425	DESEMPOLVADO TRANSPORTE FINOS SILO 60.000	
FILTRO DE MANGAS 58127	DESEMPOLVADO CARGUE CLINKER A GRANEL	24,19
FILTRO DE MANGAS 57427	DESEMPOLVADO TRANSPORTE FINOS SILO 60.000	
FILTRO DE MAGAS	DESEMPOLVADO ELEVADOR TRANSPORTE FINOS SILO 60.000	
FILTRO DE MANGAS 61214	DESEMPOLVADO DOSIFICADORES CEMENTO 1	
FILTRO DE MANGAS 61215	DESEMPOLVADO DOSIFICADORES CEMENTO 2	6,11
FILTRO DE MANGAS 63108	DESEMPOLVADO DESCARGA A BANDA NOVA 2	25,42
FILTRO DE MANGAS 63109	DESEMPOLVADO DESCARGA A BANDA NOVA 1	3,67
FILTRO DE MANGAS 63121	DESEMPOLVADO AERO COMUN CEMENTO	5,49
FILTRO DE MANGAS 62244	BARRIDO MOLINO CEMENTO 1	43,06
FILTRO DE MANGAS 62246	BARRIDO SEPARADARO MOLINO CEMENTO 1	20,34
FILTRO DE MANGAS 62248	DESEMPOLVADO ELEVADOR MOLINO CEMENTO 1	24,19
FILTRO DE MANGAS 62228	BARRIDO MOLINO CEMENTO 2	48,37
FILTRO DE MANGAS 62230	BARRIDO SEPARADOR MOLINO CEMENTO 2	14,23
FILTRO DE MANGAS 62232	DESEMPOLVADO ELEVADOR MOLINO CEMENTO 2	24,19
FILTRO DE MANGAS 62231	BARRIDO MOLINO CEMENTO 3	40,31
FILTRO DE MANGAS 62229	BARRIDO SEPARADOR MOLINO CEMENTO 3	20,16
FILTRO DE MANGAS 62234	DESEMPOLVADO ELEVADOR MOLINO CEMENTO 3	24,19
ACTUADOR LINEAL	ALIMENTACION MOLINO ROLLER PRESS	
FILTRO MANGAS 63112-31202	DESEMPOLVADO COLA BANDA NOVA 2	2,75
FILTRO MANGAS 63112-31202	DESEMPOLVADO BANDA NOVA 1	25,42
FILTRO DE MANGAS	DSEMPOLVADO BANDA 62225	21,99
ACTUADOR LINEAL	MUESTREADOR MOLINO CEMENTO 1	
ACTUADOR LINEAL	MUESTREADOR MOLINO CEMENTO 2	
ACTUADOR LINEAL	DESCARGA HACIA BANDA NOVA 1 O 2	
ACTUADOR LINEAL	DESCARGA ALIMENTACION MOLINO 1 O 3	
	TOTAL	420,26

EMPAQUE		
EQUIPO	PUNTO DE CONTROL	CAUDAL (CFM)
EMPACADORA 72105-34101	EMPACADORA 1	
APLICADOR 72107-38401	APLICADOR DE SACOS EMPACADORA 1	
FILTRO MANGAS 72115-32101	DESEMPOLVADO EMPACADORA 1	
ACTUADOR LINEAL	DESCARTASACOS EMPACADORA 1	
ACTUADOR GIRATORIO	ALIMENTADOR EMPACADORA 1	
EMPACADORA 72105-34102	EMPACADORA 2	389,05
APLICADOR 72107-38402	APLICADOR DE SACOS EMPACADORA 2	15,58
FILTRO MANGAS 72107-34802	DESEMPOLVADO EMPACADORA 2	43,97
ACTUADOR LINEAL	DESCARTASACOS EMPACADORA 2	
ACTUADOR GIRATORIO	ALIMENTADOR EMPACADORA 2	
EMPACADORA 72110-34103	EMPACADORA 3	366,1
APLICADOR 72112-38403	APLICADOR EMPACADORA 3	31,73
FILTRO MANGAS 72122-32103	DESEMPOLVADO EMPACADORA 3	21,53
ACTUADOR LINEAL	DESCARTASACOS EMPACADORA 3	
ACTUADOR GIRATORIO	ALIMENTADOR EMPACADORA 3	
EMPACADORA 72110-34104	EMPACADORA 4	506,4
APLICADOR 72112-38404	APLICADOR DE SACOS EMPACADORA 4	31,73
FILTRO MANGAS 72122-32104	DESEMPOLVADO EMPACADORA 4	21,53
ACTUADOR LINEAL	DESCARTASACOS EMPACADORA 4	
ACTUADOR GIRATORIO	ALIMENTADOR EMPACADORA 4	
FILTRO MANGAS ADICIONAL	DESEMPOLVADO LINEA 2	
CARICAMAT 1	CARGUE A GRANEL LINEA 1	8,32
CARICAMAT 2	CARGUE A GRANEL LINEA 2	
POLIMAT 1	PALETIZADORA NUMERO 1	31,19
POLIMAT 2	PALETIZADORA NUMERO 2	46,22
POLIMAT 3	PALETIZADORA NUMERO 3	46,22
SILO 6	ACTUADORES LINEALES PARTE INTERNA	
FILTRO MANGAS 71307	DESEMPOLVADO BIG BAG'S	
APLICADOR 72111	ACTUADOR BIG BAG 1	82,94
APLICADOR 72124	ACTUADOR BIG BAG 2	82,94
SILO MÖLLER	ACTUADORES LINEALES Y GIRATORIOS PARTE INTERNA	
FILTRO MANGAS 63116-31201	DESEMPOLVADO SILO MÖLLER	37,21
FILTRO MANGAS 71106-31202	DESEMPOLVADO SILO 6	5,49
SILO MÖLLER	ACTUADORES LINEALES PARTE SUPERIOR	
FILTRO MANGAS 73204-31201	DESEMPOLVADO CARGUE A GRANEL TC1	5,49
	TOTAL	1773,64

3.5 EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LOS COMPRESORES.

Para realizar una valoración de la capacidad instalada respecto a la demanda actual, es necesario analizar el comportamiento de los compresores con respecto a la fluctuación de la carga. La planta carece de instrumentos para la medición y recolección continúa de datos de flujo másico o flujo volumétrico de los compresores, que permita observar cómo se comporta la capacidad instalada frente a las necesidades de aire del sistema.

Por tal motivo se recurrió a un estudio realizado por Kaeser Compresores en el mes de septiembre del año 2014 con el programa ADA (Análisis de Demanda de

Aire), programa desarrollado y exclusivo de Kaeser Compresores, en el cual se puede observar el comportamiento de cada uno de los compresores durante su funcionamiento en la planta; ésta recolección de datos tuvo una duración de 13 días consecutivos.

En el área de Molienda de Cemento, se analizó el compresor Kaeser DSD 175 que suministra el aire comprimido para las operaciones de ésta área. Según los resultados arrojados por el estudio, se observa que el compresor trabaja a su máxima capacidad, entregando todo el caudal de aire al sistema, de 851 NCFM a una presión promedio de 95 psi (Anexo H). Según el consumo de los equipos mostrados anteriormente el área debería consumir 420 CFM, y en teoría el solo compresor debería ser capaz de mantener y suministrar el aire comprimido para las condiciones de operación del sistema. Pero se observa, haciendo mediciones en campo, que la presión de trabajo no es la adecuada para el golpeo del filtrado y se comienza a presentar inconvenientes en los equipos de más importancia para el área, los filtros de procesos. Este resultado demuestra que la demanda de aire del área es mayor a la que puede suministrar el compresor debido a una cantidad importante de fugas de aire comprimido en la red, o que la red de distribución y de servicio no está bien dimensionada y se presentan caídas de presión elevadas.

Por tal motivo se vio la necesidad de conectar el compresor número seis (6) con la red de los compresores números tres (3), cuatro (4) y cinco (5), los cuales por medio de una válvula ayudan a suplir la demanda total del caudal que se necesita para el funcionamiento aceptable del área, además sirve de respaldo del suministro del aire comprimido cuando el compresor número seis (6) se encuentre en labores de mantenimiento. Pero se debe tener cuidado, esta válvula no se puede abrir a voluntad, porque puede provocar caídas de presión en las otras áreas de la planta.

Aun así, con esta conexión entre los compresores, el filtro de barrido del Molino de Cemento 2 seguía presentando problemas de operación, entonces se vio la necesidad de instalar un compresor pequeño muy cerca a éste filtro; el compresor es un Sullair ES-8 de 55 NCFM trabajando a una presión promedio de 6,5 bar (medidos sobre el tanque pulmón ubicado a la salida del compresor). Las causas de la adición de este compresor son que el filtro se encuentra en el punto más alejado y por ende presenta la mayor caída de presión y las fugas presentes aguas abajo del filtro originan estos inconvenientes haciendo que el filtro no opere con su mayor eficiencia.

Estos dos compresores se encuentran distribuidos en lugares diferentes y a gran distancia, formando un sistema generador de aire comprimido descentralizado lo cual no es recomendable, porque no se tiene un control unificado de los mismos trabajando siempre a su máxima capacidad que generaría un consumo de energía mayor. Se recomiendan una ubicación centralizada, porque se pueden tener unidades de compresión con potencias mayores reflejándose en un rendimiento más elevado con costos de energía menores, también permite unificar las características de los compresores y conseguir que la capacidad total de carga sea menor; además que facilita y reduce los costos de supervisión y mantenimiento de los equipos.

Para el análisis del área de Empaque también se tomó como referencia el mismo estudio realizado por Kaeser Compresores. A diferencia del área de Cemento, en este sitio la ubicación de los compresores es centralizada y se pueden obtener los beneficios anteriormente nombrados. Según los datos arrojados por el programa ADA (Ver Anexo I), El compresor número uno (1), DSD 175, se encuentra entregando su máximo caudal de 851 NCFM. El compresor número 2, DSD 150, al contrario del anterior, entrega aire comprimido de forma intermitente, por

diferentes razones: El compresor suple los picos de demanda de aire comprimido del área; Algún equipo neumático estuvo en mantenimiento; O por altos inventarios, algunas líneas de producción dejaron de funcionar por un momento y se disminuyó la demanda de aire. Solo en algunos momentos se encontraba entregando todo su caudal máximo de 883 NCFM. El compresor número 3, DSD 175, muestra un comportamiento algo similar al del compresor número 1, mantiene su caudal máximo de 851 NCFM en gran parte del tiempo de estudio y se observa que disminuye la demanda de aire a las 12:00 y alrededor de las 16:00 donde se realiza el cambio de turno de los operadores y se hace control de producción e inventarios, en este momento ninguna maquina se encuentra en funcionamiento.

3.6 IDENTIFICACION DE PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA RED DE AIRE COMPRIMIDO

3.6.1 Humedad excesiva. En el área de Molienda de Cemento el sistema no cuenta con un secador a la salida de ninguno de los dos compresores, mientras que el área de empaque si cuenta con un secador para los 3 compresores.

A lo largo del tendido la red cuenta con purgas automáticas en los tanques pulmón, pero son temporizadas lo cual implica dos (2) problemas para el buen funcionamiento del sistema: que no dure lo suficiente la purga del condensado, incrementándose la posibilidad de arrastre de humedad hacia la red; o que dure demasiado y en la descarga se pierda aire comprimido. Aunque el compresor cuenta con tratamiento de aire incorporado, no es el adecuado para la calidad de aire que se necesita. La inspección de campo (Ver Figura 23) evidencia que en los puntos de consumo el aire comprimido contiene humedad, especialmente en el sitio de Cemento, por lo que se deduce que las unidades de filtrado y separación de condensados no operan eficientemente para la cantidad de aire y que se

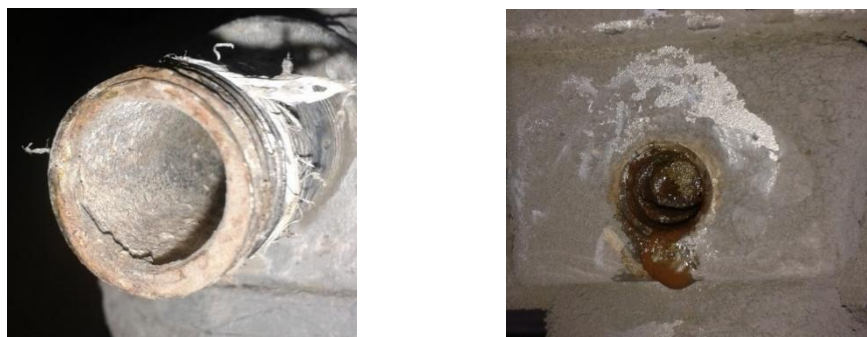
necesita un secador u otro sistema para extraer la mayor cantidad de humedad del aire comprimido, ya que por la humedad se están presentando problemas como:

- Oxidación de los elementos internos de los puntos de consumo.
- Corrosión en la tubería provocando un aumento en la rugosidad de las paredes internas del mismo, y originando una caída de presión adicional.
- Deterioro prematuro de los elementos filtrantes de los filtros de mangas, humedeciéndolas y ocasionando que el material se adhiera a ellas.
- Entorpecimiento en los accionamientos neumáticos.
- Y, en general, bajo rendimiento de toda la instalación.

Figura 23. Aire comprimido húmedo en las líneas de consumo en el área de Molienda de Cemento.



Figura 24. Corrosión interna de la tubería



En los tanques pulmón la entrada de aire debe hacer por la parte inferior del mismo y las salidas por la parte superior, con el propósito de hacer que dentro del tanque se genere un efecto turbulento y con el enfriamiento del aire se pueda lograr separar parte del agua contenida y se deposite en la parte inferior para su drenaje, pero en el tanque pulmón principal del área de molienda de cemento, la conexión a una línea de suministro está hecha por la parte inferior del tanque ocasionando que parte de este condensado sea arrastrado por el aire comprimido.

Figura 25. Conexión atípica de una línea a la salida de un tanque pulmón.



3.6.2 Mal estado de la tubería y diseños erróneos de la red. El tendido de la red de aire comprimido es aéreo, con líneas cruzando alrededor de las estructuras y/o atravesando los niveles verticalmente de las áreas. Esto es idóneo para inspeccionar el estado en el que se. La planta no cuenta con un registro actualizado de los accesorios, longitudes y diámetros con que cuenta la red de aire comprimido actual debido que a medida que se han adicionado nuevos equipos o cambiado de sitio se ha instalado nueva tubería sin ser documenta.

La línea de distribución principal, secundarias y de servicio son de acero galvanizado, en algunas zonas se encuentra corroída y cubierta por material

corrosivo (cemento fraguado) y en algunas secciones presenta una excesiva cantidad de accesorios y variaciones de diámetros.

Figura 26. Tubería cubierta con material y corroída área molienda de cemento



La línea de distribución principal del área de empaque desde el cuarto de compresores hasta las 3 líneas de distribución principales está compuesta por tubería y accesorios de aluminio anodizado de 6 pulgadas de diámetro, de acople rápido. En algunas zonas está corroída y cubierta por material corrosivo (cemento fraguado), también presenta una excesiva cantidad de accesorios y variaciones de diámetros, provocando caídas de presión no admisibles.

Gran parte de la tubería de las dos áreas está protegida de la intemperie y se encuentra en condiciones aceptables exteriormente, pero en su parte interior posiblemente se encuentre en malas condiciones, corroída por una deficiente deshumidificación y separación de condensados.

Figura 27. Tubería corroída por el cemento en el área de empaque



Figura 28. Reducciones y ampliaciones de diámetro en una misma línea en el área de empaque



3.6.3 Uso inadecuado del aire comprimido. En las dos áreas es típico encontrar personal haciendo usos inadecuados del aire comprimido, como por ejemplo, para el enfriamiento de equipos, limpieza de equipos, limpieza de ellos mismos, fluidificación de aerodeslizadores, entre otros.

Figura 29. Usos inadecuados del aire comprimido



3.7 IDENTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ACTUALES POR FUGAS DE AIRE COMPRIMIDO.

Otro problema que se puede observar a lo largo de la red de las dos áreas son las fugas de aire comprimido en la red secundaria y de consumo, como en llaves de paso, racores, empaques de válvulas diafragma, unidades de FRL, FR, y filtros de agua y aceite con regulador, muchos de éstos que se encuentran en los filtros de mangas se encuentran deteriorados y/o cubiertos por material corrosivo, por lo cual es necesario hacerles mantenimiento.

La suma de todas las fugas de aire comprimido en una planta, generalmente representa un gran volumen de aire que, además que no se aprovecha, genera una mayor caída de presión en todo el sistema, y por ende una pérdida de potencia (kW) de los compresores. Por ejemplo una fuga de 1 mm, puede perder 1 L/s de aire comprimido a una presión de 6 bar y representa 0,3 kW de la potencia

del compresor. Debido a que la gran mayoría de las fugas de aire comprimido son pequeñas, pero no despreciables, son imperceptibles, inodoras y prácticamente imposibles de ver a simple vista, se hace necesario el empleo de métodos especiales para su localización y valoración. La forma más adecuada para medir fugas es mediante el uso de un detector acústico de ultrasonido, ya que las fugas emiten ruido en la porción ultrasónica del espectro del sonido, indetectables para el oído humano.

La planta cuenta con el equipo de inspección ultrasónico Ultraprobe 9000. Éste equipo digital muestra numéricamente la intensidad de la fuga, además que anula automáticamente cualquier otro sonido que no se encuentre en el espectro de frecuencia de la fuga. El equipo de ultrasonido cuenta con una hoja de cálculo en la cual se ingresa el valor de decibeles arrojado por el equipo y la presión de la línea donde se detectó la fuga y ésta me arroja el valor de los NCFM perdidos en dicha fuga. Para la rotulación y control de las fugas encontradas en la red de aire comprimido de la planta se hizo un formato para consignar información acerca del número de la fuga, la fecha del sondeo, la zona y/o equipo principal en la que se encontró, una descripción más detallada del lugar donde se encontró la fuga y los decibeles que arroja el equipo de ultrasonido. Las etiquetas se imprimieron en acetato y se pintaron con aerosol verde fluorescente para que sean encontradas más fácilmente por el personal de mantenimiento

Figura 30. Formato control de fugas

CONTROL FUGAS

FUGA N°: _____

FECHA : _____

ZONA: _____

DESCRIPCIÓN: _____

Db: _____

CONTROL FUGAS

FUGA N°: 25

FECHA: 27/06/15

ZONA: Tanque pulmon
Complejo Sultair

DESCRIPCIÓN: Fuga en
el lado hacia
destraválvula de
descarga.

Db: 92

En algunos casos, la fuga no se encuentra focalizada en un solo punto, sino que se presenta alrededor de una superficie, como por ejemplo alrededor del empaque de una válvula de diafragma en los filtros de mangas, por lo cual resulta un poco complicado identificarla con el mismo equipo de ultrasonido. Para verificar la fuga visualmente se utilizó agua con jabón en los lugares donde había cierta incertidumbre con la ubicación exacta de la fuga y éstas quedaban en evidencia por las burbujas jabonosas de aire que aparecían.

Figura 31. Pequeñas fugas en los empaques de las válvulas diafragma en el área de molienda de cemento y empaque.



En el área de molienda de cemento se identificaron y etiquetaron 146 fugas y 12 peligros de posibles fugas debido a llaves de bola y mariposa en mal estado que dejan pasar aire comprimido por el vástago roscado. En el área de empaque se identificaron y etiquetaron 127 fugas. La gran mayoría de estas fugas se encontraron en los empaques de las válvulas diafragma de los filtros de mangas, en uniones de las mangueras con los racores y en uniones universales.

Figura 32. Elementos por donde se presentan fugas en el Área de Cemento

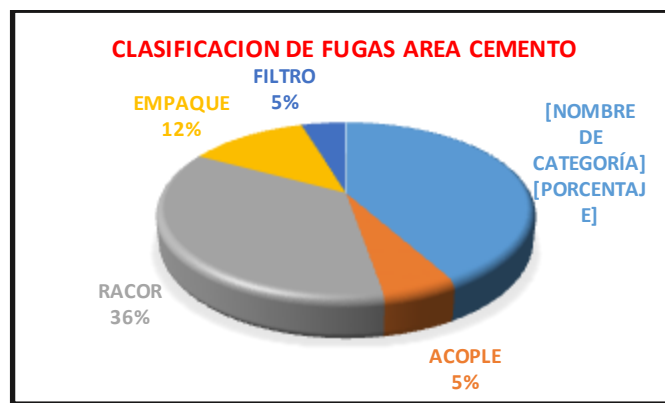
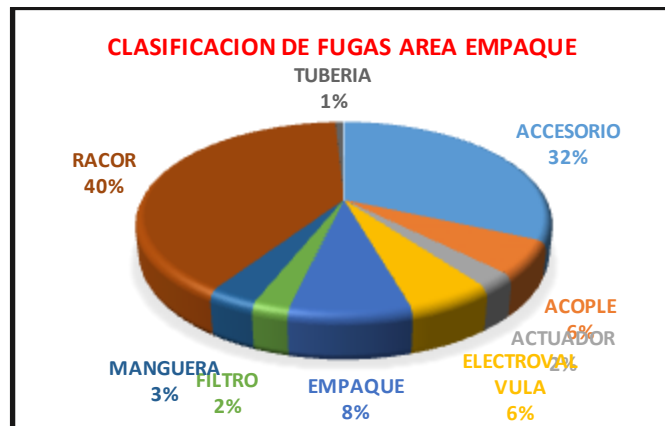


Figura 33. Elementos por donde se presentan fugas en el Área de Empaque



La identificación y rotulación de cada fuga junto con toda la información concerniente a la ubicación, descripción, decibeles y caudal asociado de dicha fuga para ambas áreas se presentan en el anexo J y K. El total de caudal perdido en el área de molienda de cemento es de: 410,66 CFM a una presión promedio de 90 PSI, equivalente a un 42,3% del caudal total entregado por los compresores. El total de caudal perdido en el área de empaque es de: 613,6 CFM a una presión promedio de 90 PSI, equivalente a un 27,3% del caudal total entregado por los compresores.

Como se observa, los porcentajes de fugas de aire comprimido son muy superiores al rango de valores recomendado del 5% a 10%. Este factor juega un papel importante en los costos de operación de una red de aire comprimido, se traducen en un consumo adicional de energía y sobreesfuerzo de los compresores, aumentando así los costos de producción y de mantenimiento. Las fugas seguirán aumentando si no les realiza la debida corrección, por lo que se debe realizar una inspección periódica de la red de aire comprimido y la programación de las reparaciones de aquellos lugares donde se detecten las fugas. Esto hará disminuir los costos de energía, mantenimiento de los compresores y evitara que se generen caídas de presión por encima de lo recomendable.

3.8 IDENTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ACTUALES DE CARGA.

Tomando como dato que se recomienda una caída de presión máxima de 0,1 bar entre la salida del tanque pulmón y el punto de consumo más alejado en una red, se evidencia un problema en las dos (2) áreas de estudio por las excesivas caídas de presión que se presentan en las líneas de distribución. Las pérdidas de carga en la red de aire comprimido son bastantes considerables ya que la tubería fue dimensionada hace aproximadamente 20 años cuando se tenía menor consumo y

unidades de compresión de menor capacidad a las actuales, las cuales manejan un caudal considerablemente mayor al especificado inicialmente, sin que se tuviera en cuenta el rediseño de la red. Adicionalmente, debido a la mala calidad del aire comprimido y a que la tubería usada es acero galvanizado se ha producido oxidación en la parte interna de la tubería, haciéndola así, de mayor rugosidad y de un diámetro aún más reducido, provocando pérdidas de presión y velocidades de flujo de aire por encima de las recomendadas,

Para calcular la caída de presión actual en ambas zonas, se levantó información de campo tomando diámetros, longitudes y accesorios presentes en la red de aire comprimido (Ver Anexo L y M).

El tramo de tubería donde se presenta la mayor caída de presión, en el caso del área de cemento es en el tramo de alimentación del filtro de mangas del filtro de barrido del molino 3 con un valor de 1,33 bar y en el área de empaque el tramo hacia el filtro de la empacadora 2 con un valor de 1,056 bar.

Un error bastante usual para mantener la presión adecuada en los puntos de consumo, es aumentar la presión de trabajo del compresor. Ésta práctica se debe erradicar ya que un aumento de 10 psi en la presión de trabajo se traduce en un aumento del 5% en el consumo de energía.

3.9 COSTO DE ENERGIA

3.9.1 Calculo del costo debido al funcionamiento de los compresores. Con los datos de la potencia consumida por los compresores en carga y el caudal generado por los mismos se puede establecer la potencia específica (kWh/cf) que permitirá calcular el costo de generar el aire comprimido.

Se entiende por potencia específica de un compresor a la relación entre la potencia eléctrica consumida y el caudal producido a una presión de servicio

estimada. La energía usada se traduce en la suma del consumo eléctrico de todos los accionamientos internos del compresor, tales como, el motor principal, el motor del ventilador de refrigeración, bombas de aceite, etc. Cuando se necesita la potencia específica para realizar cálculos sobre costos del servicio, debe tomarse a toda la unidad. Se divide el consumo total de potencia del compresor en carga por el caudal suministrado a dicha presión. La potencia específica se obtiene del cociente entre la potencia que consume el compresor a plena carga y el flujo volumétrico generado por dicho compresor como se muestra en la siguiente expresión:

$$PE = \frac{Kwh}{CFM * 60} \quad \text{Ecuación 8}$$

PE = potencia específica

CFM = pie cubico por minuto

En la tabla 9 y 10 se encuentran la potencia específica (kWh/cf) para los compresores de cada área.

Tabla 8. Potencia específica compresores molienda cemento

POTENCIA ESPECIFICA DE LOS COMPRESORES				
MOLIENDA DE CEMENTO				
COMPRESOR	CFM	CFH	KW	POT ESPECIFICA (kwh/cf)
KAESER DSD 175	737,2	44232	144,7	0,00327
SULLAIR ES-8	47,65	2859	14,91	0,00522
CAUDAL EXTRA	200	12000	39,25	0,00327
TOTAL	984,85	59091	198,86	0,00337

Tabla 9. Potencia específica compresores empaque

POTENCIA ESPECIFICA DE LOS COMPRESORES				
MOLIENDA DE EMPAQUE				
COMPRESOR	CFM	CFH	KW	POT ESPECIFICA (kwh/cf)
KAESER DSD 175	737,2	44232	144,7	0,00327
KAESER DSD 150	773,1	46386	120	0,00259
KAESER DSD 175	737,2	44232	144,7	0,00327
TOTAL	2247,5	134850	409,4	0,00304

Para obtener el costo de producción de aire comprimido se multiplica la potencia específica (kWh/cf) por el valor del kilovatio (kWh) que paga la empresa. El valor actual del (kWh) que paga la empresa es de \$ 278. En la tabla 11 y 12 se encuentra el costo del pie cubico (\$/cf) de aire comprimido de cada área. El costo del pie cubico en 1 hora se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\$_{cf} = PE * \frac{\$}{Kwh} \quad \text{Ecuación 9}$$

$\$_{cf}$ = costo del pie cúbico por hora

$\frac{\$}{Kwh}$ = costo del kilovatio por hora

Tabla 10. Costo pie cubico área molienda de cemento

POTENCIA ESPECIFICA DE LOS COMPRESORES		
MOLIENDA DE CEMENTO		
COMPRESOR	POT ESPECIFICA (kwh/cf)	COSTO POR CAUDAL (\$/cf)
KAESER DSD 175	0,00327	0,90945
SULLAIR ES-8	0,00522	1,44980
CAUDAL EXTRA	0,00327	0,90929
TOTAL	0,00337	0,93556

Tabla 11. Costo pie cubico área empaque

POTENCIA ESPECIFICA DE LOS COMPRESORES		
MOLIENDA DE EMPAQUE		
COMPRESOR	POT ESPECIFICA (kwh/cf)	COSTO POR CAUDAL (\$/cf)
KAESER DSD 175	0,00327	0,90945
KAESER DSD 150	0,00241	0,67004
KAESER DSD 175	0,00327	0,90945
TOTAL	0,00304	0,84400

El costo del pie cúbico en el área de cemento es de: 0,93556 \$/cf

El costo del pie cúbico en el área de empaque es de: 0,84400 \$/cf

Para determinar el costo del caudal de aire comprimido que se produce en la empresa en un día de trabajo, se determina considerando cuánto tiempo funciona el compresor en un día (Ver tabla 13 y 14). El funcionamiento de los compresores de ambas áreas se verifica durante todo el día, excepto los días en los que se les realiza mantenimiento. El costo de operación del sistema de aire comprimido en la planta en el año se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{\$}{\text{dia}} = 24 * \frac{CF}{\text{hora}} * \$_{cf} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\$_{\text{año}} = \frac{\$}{\text{dia}} * \text{dias}_{\text{año}} * F_{UC} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{CF}{\text{hora}} = \text{pies cubicos por hora}$$

$\$_{\text{año}}$ = costo produccion aire comprimido al año

$$\frac{\$}{\text{dia}} = \text{costo produccion aire comprimido por dia}$$

$$\text{dias}_{\text{año}} = 365$$

F_{UC} = factor de utilización al año, se toma 90%

Tabla 12.Costo de generación de aire comprimido en el área de molienda de cemento.

COSTO FUNCIONAMIENTO COMPRESORES						
MOLIENDA DE CEMENTO						
COMPRESOR	CFM	CFH	TIEMPO DE TRABAJO EN CARGA (h)	CAUDAL DE AIRE EN UN DIA DE TRABAJO (cf/dia)	COSTO EN UN DIA DE PRODUCCION (\$/dia)	COSTO EN UN DIA DE PRODUCCION ANUAL (\$/año)
KAESER DSD 175	737,2	44232	24	1.061.568	965.438	317.146.514
SULLAIR ES-8	47,65	2859	24	68.616	99.480	32.679.022
EXTRA	200	12000	24	288.000	261.876	86.026.266
COSTO DEBIDO AL FUNCIONAMIENTO DE LOS COMPRESORES					1.064.918	435.851.803

Tabla 13. Costo de generación de aire comprimido en el área de empaque

COSTO FUNCIONAMIENTO COMPRESORES						
MOLIENDA DE EMPAQUE						
COMPRESOR	CFM	CFH	TIEMPO DE TRABAJO EN CARGA (h)	CAUDAL DE AIRE EN UN DIA DE TRABAJO (cf/dia)	COSTO EN UN DIA DE PRODUCCION (\$/dia)	COSTO EN UN DIA DE PRODUCCION ANUAL (\$/año)
KAESER DSD 175	737,2	44232	24	1.061.568	965.438	317.146.514
KAESER DSD 150	773,1	46386	24	1.113.264	745.930	245.037.874
KAESER DSD 175	737,2	44232	24	1.061.568	965.438	317.146.514
COSTO DEBIDO AL FUNCIONAMIENTO DE LOS COMPRESORES					2.676.806	879.330.902

El costo de producir aire comprimido de los compresores del área de molienda de cemento es de: 435'851.803 \$/año. El costo de producir aire comprimido de los compresores del área de empaque es de: 879'330.902 \$/año.

3.9.2 Costo debido a fugas. En la sección 3.7 se determinó el caudal perdido debido a fugas en la red de aire comprimido, este se puede observar en la tabla 15. Para determinar el costo debido a las fugas, se realiza el producto del costo del pie cúbico (\$/cf) de todos los compresores del área por el valor de la fuga diaria de toda el área (cf/día). El costo debido a las fugas se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\$_{fugas} = Minutos_{año} * CFM_{fuga} * F_{uc} * \$_{cf} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Minutos_{año} = 525600$$

CFM_{fuga} = pie cubico por minuto de la fuga

F_{uc} = factor de utilización al año, se toma 90%

$\$_{cf}$ = costo del pie cúbico por hora

Una pérdida de caudal por medio de fugas, se traduce en una pérdida de potencia del compresor, es energía que no se está aprovechando (Ver tabla 15). La potencia pérdida debido a las fugas se obtiene mediante esta expresión:

$$Kw_{fuga} = 60 * CFM_{fuga} * PE \quad \text{Ecuación 13}$$

Kw_{fuga} = perdida de potencia debido a fugas

CFM_{fuga} = pie cubico de la fuga

Tabla 14. Costos debido a las fugas

COSTOS DE LAS FUGAS EN AMBAS AREAS					
AREA	CAUDAL DE FUGA (CFM)	CAUDAL DE FUGA (CF/día)	COSTO DE FUGA DIA (\$/día)	POTENCIA POR FUGAS (Kwh)	COSTO DE FUGA AL AÑO (\$/año)
MOLIENDA DE CEMENTO	466,34	671.524,68	628.255,14	94,16	206.381.814
EMPAQUE	613,59	883.570,94	745.731,43	111,77	244.972.775
COSTO TOTAL DE FUGAS DE LAS AREAS					451.354.590

Para el area de Cemento la potencia perdida de los compresores por fugas es de 94,16 Kwh y para el area de Empaque es de 111,77 Kwh, éstas perdidas de potencia se traducen en un costo asociado que equivalen a 206'381.814 COP y 244'972.775 COP respectivamente, para un total entre las dos (2) areas de 451'354.590 COP.

3.10 COSTO DEBIDO A MANTENIMIENTO POR BAJA CALIDAD DE AIRE

Lamentablemente en la planta no se tiene registro de la causa del mantenimiento de los equipos cuando influye la baja calidad del aire, así que para esta parte, se recurrió a la experiencia de los técnicos mecánicos e ingenieros de mantenimiento y expresaron que aproximadamente en el área de cemento donde más filtros de mangas hay y no se tiene ningún tipo de tratamiento, el costo por mantenimiento está en el orden de los 5.000 USD anuales. Para el área de empaque no se tiene en cuenta este costo ya que el cuarto de compresores cuenta con su sistema de tratamiento de aire comprimido.

3.11 DIAGNOSTICO Y EVALUACION DEL DISEÑO ACTUAL

Como resultado de la auditoría realizada a la red de aire de la planta CEMEX CARACOLITO, se resaltan los siguientes aspectos a considerar en un rediseño y optimización de la red:

- Los equipos generadores de aire comprimido no se encuentran en condiciones ambientales favorables, aunque se encuentren en un cuarto de compresores, excepto en Sullair ES-8 de cemento que está a la intemperie, no están completamente aislados del polvo del exterior, lo que conlleva a que los intercambiadores de calor se ensucien y los compresores empiecen a fallar por temperatura.
- En el área de molienda de cemento se puede observar que en los diferentes puntos de consumo, el aire comprimido contiene humedad, a tal punto, que en la tubería se presenta acumulación de condensados, aunque en los puntos de consumo cuentan con unidades de mantenimiento se observa que no están diseñadas para filtrar el agua líquida por lo que en los equipos usuarios se va a presentar condensados. Las purgas automáticas que están instaladas en los tanques pulmón no son eficientes. Se recomienda la instalación de un sistema de secado y separación de condensados del aire comprimido. En el área de

empaques si se cuenta con un secador a la salida del tanque pulmón principal y no se ha evidenciado acumulación de condensados por esta red.

Para evitar que partículas de óxido, polvo o humedad lleguen a los actuadores o válvulas se hace imprescindible la utilización de unidades de mantenimiento y filtros reguladores, con el propósito de que el aire comprimido que llega a los equipos llegue seco y limpio.

- Se puede observar que la tubería se encuentra corroída, cubierta por material corrosivo y en algunas zonas a la intemperie. La tubería que exteriormente se encuentra en buenas condiciones no presenta ningún tipo de rotulación o demarcación para diferenciarlas de las otras tuberías.
- El diseño actual de la red no presenta dispositivos de cierre en las distintas secciones de la red de distribución cuando se necesite hacer alguna reparación, además presenta muchas variaciones de diámetro en la tubería y una cantidad excesiva de accesorios como codos, tee's y uniones universales.
- Se presenta una gran cantidad de fugas en la red de aire comprimido en las dos áreas, siendo más crítica el área de molienda de cemento, en su mayoría fugas pequeñas presentes en empaques o en las roscas de los accesorios haciéndolas inodoras e imperceptibles.
- Las pérdidas por fugas como se mostró en la sección 3.7 ascienden a 466,34 CFM para el área de Cemento y 613,59 CFM para el área de Empaque, que equivalen a un 47,35% y 27,3% respectivamente del caudal suministrado por los compresores. Estos caudales son muy elevados, especialmente en el área de Cemento, superando por mucho los valores recomendados de entre un 5% - 10% del caudal consumido por los equipos usuarios. Este factor juega un papel muy importante en cuanto al costo de energía, pues es aire que se está comprimiendo pero no se está aprovechando, además se impacta en la regulación de los compresores ya que no pueden realizar su ciclaje con el respectivo ahorro en el consumo de energía.

Por lo tanto, es necesario realizar una inspección periódica de la red para identificar nuevas fugas y con ello programar su reparación y ver reflejado los resultados en un mejor rendimiento de los equipos y en el ahorro de energía.

- Se espera un ahorro potencial importante eliminando los costos por las fugas de aire comprimido que ascienden a un valor anual de más de 450 millones de pesos (COP). Como no es posible corregirlas todas, se debe procurar llevarlas al rango de valores recomendado del 5% a 10% del consumo de los equipos usuarios.
- En cuanto a las pérdidas de carga, como se observa en el anexo L y M, la caída de presión asciende a 1,33 bar para el área de Cemento siendo nuevamente el área con mayores problemas y 1,056 bar para el área de Empaque, excediendo el valor máximo recomendado de 0,1 bar sobre la presión de servicio, provocando mal funcionamiento de los equipos o un consumo extra de energía en los compresores. La principal causa es el dimensionamiento inadecuado de la tubería, haciendo que las velocidades de flujo que circula por ellas sean muy altas y ocasionen elevadas pérdidas de presión.
- En la tabla 15 se muestra que comprimir aire es bastante costoso, por eso se debe crear la cultura que el aire comprimido no se debe desperdiciar en usos diferentes a generar potencia.

4. REDISEÑO Y CÁLCULO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

En todo proyecto de rediseño y optimización de una red de aire comprimido, se debe tener presente que ésta red debe cumplir con cuatro (4) condiciones importantes:

- Mínima pérdida de presión
- Mínima pérdida de fugas
- Óptima Calidad del aire
- Adecuadas condiciones de operación de los compresores

Estos parámetros inciden en el rendimiento económico de una instalación de aire comprimido y se deben analizar cuidadosamente para un buen desempeño.

4.1 DETERMINACION DE LA DEMANDA DE AIRE

Antes de empezar con el diseño se deben establecer las necesidades cuantitativas de aire comprimido individuales de los dispositivos usuarios, sumar todos los requerimientos de los dispositivos puede llevar a resultados incorrectos, ya que no todos utilizan el 100% del tiempo y no todos se utilizan al mismo instante. El tiempo efectivo de algunos equipos no puede determinarse exactamente y se debe calcular por medio de un factor de simultaneidad.

Para determinar la demanda de aire en las dos áreas se ha tenido en cuenta la información requerida en los procedimientos recomendados por el fabricante Kaeser Compresores⁸:

- Número de consumidores.
- Consumo de aire de los consumidores.

⁸ Kaeser Compresores; *Manual de Aire Comprimido*; Primera Edición; 2013; p. 273

- Grado de utilización.
- Factor de simultaneidad.
- Margen de fugas. (5% - 8% consumo total actual)
- Margen de expansión para los próximos 5 a 10 años. (20% - 50% consumo total actual)

Se definen dos procedimientos de cálculo diferente para los filtros y para los otros equipos usuarios como las empacadoras y las paletizadoras. Los filtros de mangas se han personalizado de acuerdo al proceso, dependen de varios parámetros como el tipo de válvula diafragma, presión de trabajo y el tiempo de duración del pulso. Al no contar con un equipo de medición de flujo, se hizo la medición en campo en el horario en que los equipos se encuentran a plena carga entre las 8:30 am A 12 am y 1 pm a 3:30 pm, midiendo los tiempo entre golpes, el número de golpes en un tiempo determinado y el diámetro de la conexión con el filtro.

En los filtros de mangas, se determinó que la presión de trabajo de la red es de 90 psi. Para el cálculo del consumo de aire comprimido se utiliza la siguiente expresión⁹:

$$V_{vi} = 4,452 * K_v * P_u \quad \text{Ecuación 14}$$

V_{vi} = volumen por segundo de cada valvula (NCFM)

K_v = factor de flujo, depende de cada valvula

P_u = presion absoluta de entrada de la valvula (bar)

El valor de V_{vi} es el consumo de aire de la válvula diafragma sin tener en cuenta el valor de duración del pulso, ahora se debe multiplicar este dato por el factor adimensional de utilización del equipo para obtener el consumo actual.

⁹ http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_en/pdf1/x003jagb.pdf

$$V_s = \sum(V_{vi} * F_{ui}) \quad \text{Ecuación 15}$$

F_{ui} = factor de utilización individual

V_s = caudal por valvula considerando los factores [NCFM]

El factor de utilización se calculó tomando en cuenta el tiempo de duración del pulso con respecto al tiempo de duración entre golpes aplicando la siguiente expresión:

$$F_u = \frac{t_{disparo}}{T_{ciclo}} * 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

$t_{disparo}$ = tiempo de duración del disparo (s)

T_{ciclo} = tiempo de duración entre golpes (s)

El tiempo de disparo o de apertura de la válvula en promedio para los filtros de manga es de 0,15 segundos y el tiempo de duración entre golpes depende de cada equipo, según características del proceso. El valor de V_s se expresa en cantidades normales, aplicando la ecuación 1 se calcula la entrega de aire libre a las condiciones ambientales de la planta, mencionadas en la sección 1.5. A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para el filtro de mangas 38414-31202, los resultados se resumen en la tabla 16 y los consumos de los demás filtros se pueden ver en el anexo N. Los cálculos se hicieron con el software EES (Engineering Equation Solver).

$$P_u = 7,21 \text{ [bar]}$$

$$K_v = 44$$

$$P_n = 1 \text{ [bar]}$$

$$P_a = 0,95 \text{ [bar]}$$

$$HR = 0,7$$

$$P_d = 0,0424 \text{ [bar]}$$

$$t_{disparo} = 0,15 \text{ [seg]}$$

$$f_{golpeo} = 11 \text{ [seg]}$$

$$T_n = 20 + 273,15 \text{ [K]}$$

$$T_a = 35 + 273,15 \text{ [K]}$$

$$F_u = \frac{t_{\text{disparo}}}{f_{\text{golpeo}}} \cdot 100$$

$$V_v = 4,452 \cdot K_v \cdot P_u$$

$$V_s = V_v \cdot \frac{F_u}{100}$$

Tabla 15. Consumo filtro de mangas 38414-31202

DET DEL EQUIPO	38414-31202
ÁREA	MOLIENDA DE CEMENTO
EQUIPO	DESPOLVADO BANDA P. ADITIVOS
FRECUENCIA (GOLPEO/MIN)	5,5
INTERVALO GOLPEO (SEG)	11,0
MARCA	GOYEN
CONEXIÓN	1 1/2
PRESION (PSI)	90
PRESION ABS (bar)	7,21
KV	44
CONSUMO POR CATALOGO (CFM)	1411,74
FACTOR DE UTILIZACION	1,36
CONSUMO POR FILTRO (NCFM)	19,25
CONSUMO POR FILTRO (ACFM)	21,99

El dato de consumo para las empacadoras y las paletizadoras y otros equipos, se obtiene de los catálogos del fabricante. Para el cálculo del consumo de estos equipos se adicionó un 3% de más, para considerar los efectos de desgaste del equipo. Con estos equipos, no es posible la determinación del tiempo de

utilización de cada uno, por lo que la suma de sus caudales se corrige utilizando un factor de simultaneidad.

$$V_{equipos} = F_s \cdot \sum V_{catalogo} \quad \text{Ecuación 17}$$

$V_{equipos}$ = consumo total de los equipos (CFM)

F_s = factor de simultaneidad

$V_{catalogo}$ = factor de simultaneidad

Para el factor simultaneidad, se toma un valor de 88% de forma empírica, con base en las observaciones de campo en las que se evidencia que estos equipos se mantienen operando de forma casi continua durante los turnos de trabajo.

En la tabla 17 se muestra los resultados del ejemplo de cálculo para un equipo neumático y en el anexo O se encuentra el consumo de aire comprimido de los demás equipos. Los cálculos se hicieron con el software EES (Engineering Equation Solver).

$$Q_{catalogo} = 31,78 \text{ [NCFM]} \quad Q_{equipo} = 1,03 \cdot Q_{catalogo} \quad F_s = 0,88$$

$$Q_{actual} = Q_{equipo} \cdot F_s$$

$Q_{catalogo}$ = caudal entregado por el fabricante [NCFM]

Q_{equipo} = caudal nominal mas un porcentaje por desgaste [NCFM]

Q_{actual} = caudal actual [NCFM]

Tabla 16. Consumo Polimat M-40

DET DEL EQUIPO	72623-34601
EQUIPO	POLIMAT 1 M-27
CAUDAL (Nm ³ /h)	54
CAUDAL (NCFM)	31,78
CONSUMOS MAS DESGASTE (3%)	32,73
FACTOR DE SIMULTANEIDAD	0,88
CONSUMOS DE LOS EQUIPOS (NCFM)	28,81
CONSUMOS DE LOS EQUIPOS (ACFM)	32,90

A partir del caudal real que consumen los equipos, se puede calcular la cantidad de aire comprimido que se requiere generar, a éste dato se recomienda sumar un 5% como factor de error de cálculo, 8% para pérdidas por fuga y un 20% para futuras ampliaciones. El caudal de aire comprimido requerido para ambas áreas se muestra en la tabla 18.

Tabla 17. Entrega y consumos de aire comprimido de las áreas

ENTREGA Y CONSUMOS DE AIRE COMPRIMIDO AREA DE CEMENTO	
ITEM	ACFM
COMPRESOR DSD 175	737,20
TOTAL	737,20
5% FILTROS DE MANGAS	441,27
5% EQUIPOS	118,97
8% FUGAS	44,82
20% AMPLIACIONES	112,05
TOTAL	717,10

ENTREGA Y CONSUMOS DE AIRE COMPRIMIDO AREA DE EMPAQUE	
ITEM	ACFM
COMPRESOR DSD 175	737,20
COMPRESOR DSD 150	773,10
COMPRESOR DSD 175	737,20
TOTAL	2247,50
5% FILTROS DE MANGAS	141,98
5% EQUIPOS	1563,61
8% FUGAS	136,45
20% AMPLIACIONES	341,12
TOTAL	2183,15

Como se puede observar en la tabla anterior el caudal entregado por los compresores es mayor que la demanda de aire, inclusive considerando un porcentaje para posibles ampliaciones en el futuro. Cabe resaltar que en el área de cemento, viéndolo desde el punto de vista de consumos, el compresor Kaeser DSD 175 N° (6) es capaz de suministrar el aire demandado por los equipos, es decir, se puede sacar de servicio el compresor Sullair ES-8 y cerrar la llave que comunica los compresores tres (3), cuatro (4) y cinco (5) con el seis (6).

4.2 CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AIRE COMPRIMIDO

Es de gran importancia que el aire comprimido sea de la calidad adecuada para nuestro requerimiento. El aire aspirado por los compresores puede contener sustancias no deseadas como polvo, agua en forma de vapor y partículas de aceite. Teniendo como referencia la norma ISO 8573 -1 (2010) (Ver anexo P) la cual clasifica los sistemas de aire comprimido en relación con la calidad de aire producido, podemos tratar el aire comprimido según las necesidades de cada área. El fabricante de cada equipo recomienda la calidad de aire comprimido que se le debe suministrar a sus equipos para un óptimo funcionamiento y prolongar la vida útil de sus componentes.

En el área de cemento aire comprimido será utilizado, en su mayoría, en golpeo de los filtros de mangas, los fabricantes no especifican la calidad del aire en sus catálogos de acuerdo a la clasificación de la norma ISO 8573 -1 (2010), solo recomiendan que el aire debe ser seco y libre de partículas y aceites. Para el estudio de la humedad se deberá hacer un análisis psicométrico para calcular las humedades a la salida de los elementos de tratamiento del aire y poder dar un veredicto de cual tipo de tratamiento es el más adecuado tanto técnica como económicamente.

4.2.1 Análisis psicrométrico. Se sabe que el aire atmosférico contiene cierta cantidad de vapor de agua, ésta cantidad se encuentra en mayor o menor proporción dependiendo de las condiciones ambientales del lugar. Es importante realizar el estudio psicrométrico de la red de aire comprimido para saber con cuanta cantidad de humedad llegara el aire a los equipos finales y seleccionar los elementos para su tratamiento. El análisis psicrométrico para el área de empaque se muestra en el anexo Q.

Como se puede en los resultados en el anexo Q., el secador frigorífico es el que mejor deshumidifica el aire comprimido, es decir, por las tuberías llevara menos cantidad de agua en suspensión. Ambos tipos de secadores cumplen con los requerimientos de aire seco para la aplicación. Para seleccionar uno u otro secador se deben tener en cuenta otros factores como económicos, mantenimiento, gasto de energía eléctrica y continuidad del servicio. Para el requerimiento de calidad de aire comprimido en cuanto a cantidad de partículas y aceite es necesario colocar un filtro después del equipo de des humidificación. Por recomendación de los ingenieros de planta se exige calidad 2 para partículas de polvo y cantidad de aceite.

En el área de empaque la calidad del aire comprimido lo recomienda el fabricante de los equipos de paletizado y empackado, Ventomatic recomienda suministrar el aire comprimido con la siguiente calidad:

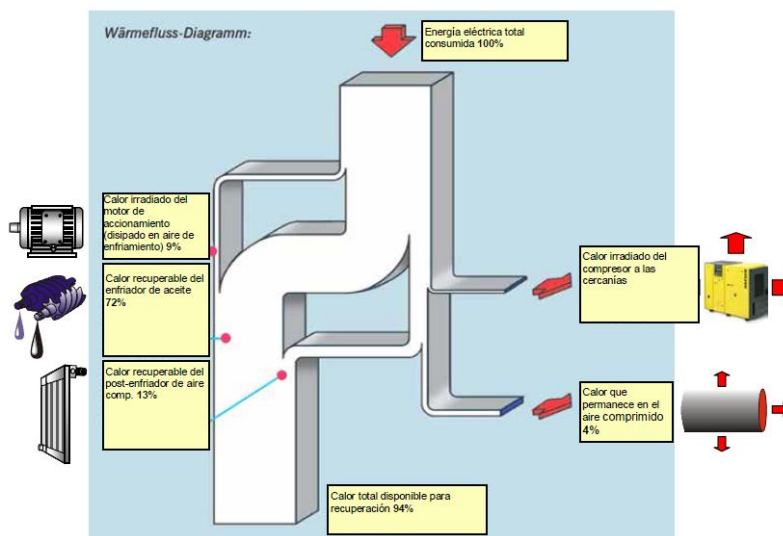
- Partículas < 25 μm
- Humedad < 5 °C Punto de rocío
- Aceite < 0,05 mg/ m^3

Esta área ya cuenta con un sistema de tratamiento de aire comprimido. El secador refrigerativo TI901E seca el aire hasta un punto de rocío de 3°C. El filtro desoleador remueve partículas sólidas de hasta 0,01 micrones y el paso de aceite de 0,01 mg/m³. La ubicación de los equipos de tratamiento deben estar instalados a la salida del tanque pulmón principal, éste tanque se encuentra ubicado en la parte trasera de la subestación de cemento, un lugar que no cuenta con buena ventilación para el correcto funcionamiento de los equipos de des humidificación. La mejor ubicación de cualquiera de los equipos de tratamiento de aire, es en el nivel de las bandas dosificadoras justo al lado del elevador de cangilones de la Roller Press, es un lugar más fresco y el más cercano al tanque pulmón (Ver anexo S).

4.3 VENTILACIÓN DEL CUARTO DE COMPRESORES

Según la figura 35 el 94% del calor generado por el compresor puede ser removido a través de un ducto de extracción, el porcentaje restante será el calor irradiado por el compresor y por la tubería del aire comprimido, sin embargo, el mismo ducto de extracción irradia calor hacia el cuarto de compresores. Por tal motivo, y contemplando un factor de seguridad, se asumirá que el 20% del total del calor generado por el compresor será irradiado hacia dentro del cuarto de compresores, cantidad que deberá ser extraído del mismo.

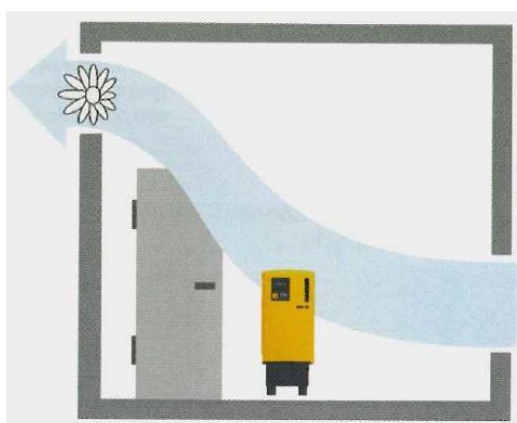
Figura 34. Diagrama de flujo de calor



Fuente: Fuente: Kaeser Compresores; Manual de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013; p. 228

Para asegurarnos un flujo continuo de entrada y salida del aire de ventilación del cuarto de compresores se optó por ventilación forzada con extractores de aire colocados en la parte superior de la sala.

Figura 35. Ventilación forzada



Fuente: Kaeser Compresores; Manual de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013; p. 295

El sistema de ventilación debe estar diseñado de forma tal que la diferencia de temperaturas del aire exterior con el interior sea de 5 K, a fin de evitar sobrecalentamiento de los equipos y que se vayan a paro por temperatura.

Utilizando la fórmula de balance de energía, procederemos a calcular la cantidad de aire que debe ser extraída del cuarto de compresores principal.

$$0,2 \cdot \dot{W}_{\text{compresor}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

En donde:

$$\dot{W}_{\text{compresor}} = 818,8 \text{ [kW]} \quad \rho = 1,092 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \Delta T = 5 \text{ [K]}$$

Ahora se calcula el caudal que debe ser removido del cuarto y el número de extractores que deben instalarse en el sitio

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \text{Num}_{\text{extractores}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{ventilador}}}$$

El 20% considerado en los cálculos se toma teniendo en cuenta que las campanas extractoras en este cuarto están bien diseñadas, procurando la menor resistencia al flujo del aire caliente. El flujo necesario a extraer del cuarto principal es de 29,79 m³/s. El tipo de extractor más grande que utiliza la planta maneja un flujo de 2,93 m³/s, entonces según el cálculo se necesitan 10,17 extractores, se aproxima al número entero siguiente, es decir 11 extractores. Actualmente la sala cuenta con 6 extractores, entonces deben instalarse 5 extractores más en dicho cuarto.

En el caso del cuarto de compresores de empaque los ductos no están bien diseñados, tiene muchos cambios de sección lo que provoca una deficiente remoción del calor de los compresores como se ven en la figura 37.

Figura 36. Ducto extractor de aire caliente cuarto de empaque



Por éste motivo en los cálculos se tomó un 30% del calor del total del calor generado. A la potencia de los compresores debe sumarse el calor generado por el secador frigorífico que no cuenta con campana de extracción de aire caliente como se muestra en la siguiente expresión:

$$0,3 \cdot \dot{W}_{\text{compresor}} + \dot{W}_{\text{secador}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

El flujo necesario a extraer del cuarto principal es de 25,15 m³/s. El tipo de extractor es el mismo del cuarto principal. Según el cálculo se necesitan 8,58 extractores, entonces se aproxima al número entero siguiente, es decir 9 extractores. Actualmente la sala cuenta con 5 extractores, entonces deben instalarse 4 extractores más en el cuarto.

4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES DE AIRE COMPRIMIDO

La selección del tanque pulmón está en función de la capacidad del compresor, el patrón de consumo del aire, el diferencial de presión y principalmente el tiempo en que el compresor entra a trabajar en vacío.

En la sección 4.1 se calculó el consumo actual de cada área y la entrega de los compresores.

A continuación se mostrará un ejemplo de cálculo del dimensionamiento de tanque comprimido para el área de Cemento. Para el área se tiene la siguiente entrega del compresor seis (6):

$$C_{6_{175}} = 737,2 \text{ [CFM]} \quad C_{6_{175m}} = C_{6_{175}} \cdot \left[0,000471947 \cdot \frac{m^3/s}{CFM} \right]$$

$C_{6_{175}}$ = caudal de entrega del compresor 6 [CFM]

$C_{6_{175m}}$ = caudal de entrega del compresor 6 $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

El consumo total del área es igual al consumo de los equipos más el consumo por fugas

$$C_{eq} = 560,24 \text{ [CFM]}$$

$$C_{fuga} = 44,82 \text{ [CFM]}$$

$$C_{total} = C_{eq} + C_{fuga}$$

$$C_{totalm} = C_{total} \cdot \left[0,000471947 \cdot \frac{m^3/s}{CFM} \right]$$

C_{eq} = caudal de los equipos [CFM]

C_{fuga} = caudal de fuga del area [CFM]

C_{total} = caudal total de consumo del area [CFM]

C_{totalm} = caudal total de consumo del area $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$$C_{\text{totalm}} = \text{caudal total de consumo del area} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

El cálculo del dimensionamiento del tanque se realizó teniendo en cuenta que las presiones de trabajo sean de máximo 7 bar y mínimo 5,5 bar para el área de cemento y mínimo 6 bar para el área de empaque. Para calcular la capacidad del tanque de almacenamiento, se recurre a la ecuación 2 descrita en la sección 2.6.1.

$$V = \left[\frac{C_{\text{excem}} \cdot t_{\text{carga2}} \cdot P_{\text{atm}}}{P_1 - P_2} \right] \cdot 1000$$

Considerando que el tiempo en que el compresor se encuentra en vacío sea de 60 segundos recomendado por el fabricante Kaeser para evitar daños prematuros en las válvulas de aspiración y de entrega. La suma de los tamaños de los tanques para el área de cemento deberá ser de 10851 L. Actualmente el área cuenta con 6500 L en almacenamiento de tanques de aire comprimido, por ende, necesitará 5000 L de almacenamiento extra. De éste volumen total se repartirán en 2 tanques de 2000 L y un tanque de 1000 L, que serán ubicados al lado de los filtros de mangas de procesos de cemento 1,2 y 3, respectivamente (Ver anexo T).

En el caso del área de empaque, se sigue el mismo tipo de cálculo anterior. En ésta área se cuenta actualmente con 11050 L de almacenamiento en tanques de aire comprimido. Para llegar al tiempo en vacío de 60 segundos por compresor se debe tener, por lo menos 17391 L, por lo que se podrá adicionar en tanques 6500 L. De éste volumen total se repartirán en 3 tanques de 2000 L y uno de 1000 L los cuales se ubicarán de la siguiente manera: Los 3 tanques de 2000 L serán ubicados a la entrada del aire comprimido en cada paletizadoras y el tanque de

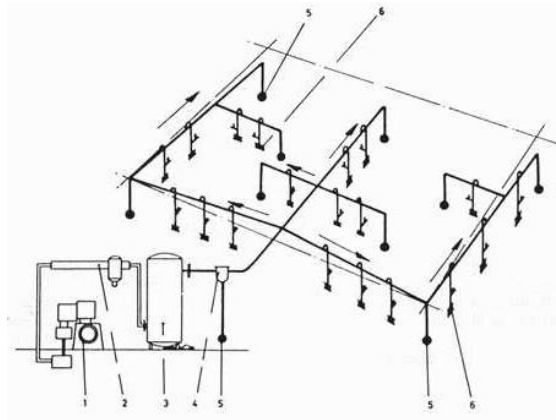
1000 L se ubicara a la entrada de los filtros de mangas de las empacadoras 3 y 4 (Ver anexo U).

4.5 DISTRIBUCION DEL AIRE COMPRIMIDO

El sistema de distribución de la red de aire comprimido debe cumplir con 2 requisitos básicos: mínima cantidad de fugas presentes en la red y una baja caída de presión entre la presión de servicio y el punto más alejado de consumo. Por recomendaciones de los expertos la máxima pérdida de caudal por fugas es del 8% a lo largo de todo el tendido de la red. En el rediseño de la red de aire comprimido, se intentó aprovechar al máximo las instalaciones actuales de tubería, de tal manera de no generar costos adicionales en inversiones e instalaciones o realizar cambios fuertes en la red.

Antes de empezar a hacer cálculos de caídas de presión, se debe preguntar qué tipo de red es la más idónea para la entrega eficiente del aire comprimido: abierta o cerrada? Las redes de distribución abierta se utilizan usualmente en sistema en donde no se tiene un equipo de des humidificación del aire, la tubería de distribución se instala con cierta pendiente para que los condensados se puedan separar por medio de purgas.

Figura 37. Red de distribución tipo abierta

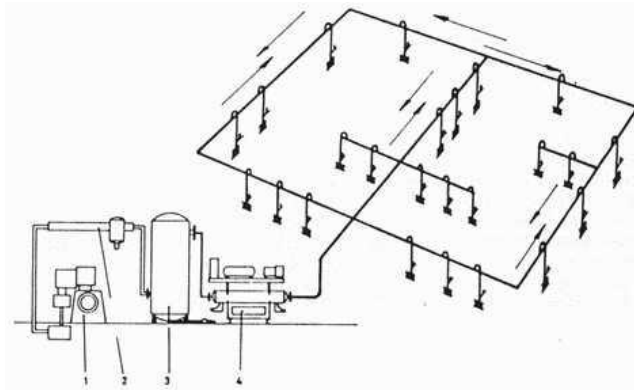


Fuente: E. Carnicer Royo; Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones; Segunda Edición; 1994; p. 225

Si la red cuenta con un sistema de tratamiento de aire, es indiferente el tipo de red que se implemente. Es incorrecto afirmar que un circuito cerrado se equilibra las presiones. La caída de presión en una tubería depende exclusivamente del diámetro de la misma que viene dado en función del caudal y la longitud que tenga¹⁰. Formar una red de distribución cerrada genera un aumento en el costo de la tubería puesto que se necesita más longitud.

¹⁰ E. Carnicer Royo; *Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones* ; Segunda Edición; 1994; pp.212-213

Figura 38. Red de distribución tipo cerrada o en anillo



Fuente: E. Carnicer Royo; Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones; Segunda Edición; 1994; p. 225

Bajo la premisa, de que el aire comprimido en ambas áreas ya se encuentra tratado y observando que la red tipo cerrada no ofrece una ventaja visible en cuanto a la tipo abierta, se opta por el diseño actual. Una vez escogido el tipo de distribución se procede al cálculo de caída de presión de las áreas de Cemento y Empaque. Para este cálculo se deben considerar los siguientes factores.

- Caudal
- Longitud efectiva de la tubería
- Rugosidad
- Presión de operación

En este análisis se tomó como punto de diseño la caída de presión máxima de 0,1 bar entre la presión de servicio y el punto más lejano de consumo, recomendado por los expertos. El método de cálculo se realizó de la siguiente manera:

1. Se determinan las redes de distribución para su análisis independiente.

2. Se determinan la longitud de los segmentos y la longitud equivalente de los accesorios.
3. Se calcula la caída de presión mediante la ecuación 6
4. Se compara el valor de la caída de presión con el recomendado por los expertos.

Si el valor de la caída de presión cumple con la recomendación, el diámetro de ese tramo ese el adecuado, de no ser así, se escoge el siguiente diámetro y se vuelve a calcular la caída de presión hasta que se encuentre dentro del rango. Si los diámetros de tubería son más pequeños al diámetro óptimo, puede ocasionar grandes caídas de presión, sin embargo, se puede caer en el error de sobredimensionar el diámetro de la tubería lo que significa un costo en inversión de material no justificable. En el mercado se ofrece varios tipos de tubería para la distribución de aire comprimido, de entre las cuales 2 materiales son los más usados, la tubería convencional de acero galvanizado y la tubería de vanguardia de aluminio; cada una presenta ventajas y desventajas.

Figura 39. Tubería de acero galvanizado



Fuente: <http://www.tuboscolmena.com/web/index.php>

Figura 40. Tubería de aluminio



Fuente:

http://www.parkertransair.com/jahia/webdav/site/transair/shared/Download/pdf/BUL_T0058_ES.pdf

Para el cálculo de las dimensiones de diámetro en cada tramo se utilizó una plantilla en Excel (ver anexo V). Los resultados de los cálculos de caída de presión para ambos materiales de tuberías se muestran en el anexo W y X, con los diámetros adecuados para la recomendación de máxima caída de presión.

A continuación se muestra con un ejemplo el cálculo del dimensionamiento del diámetro de tubería. Previamente se calcula la caída de presión en un tramo de tubería actual y luego se calcula con un diámetro nuevo y con los dos tipos de materiales. Los datos de entrada del tramo a estudiar son los siguientes:

$$e = 0,15 \text{ [mm]} \quad \rho = 8,045 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \mu = 0,00001872 \text{ [kg/m*s]}$$

$$P_{pa} = 528000 \text{ [Pa]} \quad D = 0,0158 \text{ [m]} \quad L = 8,23 \text{ [m]}$$

$$T_{instalacion} = 15 \text{ [años]} \quad C_{tiempo} = 0,02$$

$$\dot{Q} = 60 \cdot \left[0,000471947 \cdot \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{CFM}} \right]$$

e = rugosidad nominal del material [mm]

ρ = densidad del aire comprimido $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

μ = viscosidad cinemática del aire comprimido $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}} \right]$

P_{pa} = presión inicial del tramo [Pa]

D = diametro interno de la tubería [m]

L = longitud del tramo [m]

$T_{\text{instalación}}$ = tiempo estimado de la instalación [años]

C_{tiempo} = constante adimensional

La humedad que se condensa dentro de la tubería con el paso del tiempo genera corrosión que provoca un aumento en la rugosidad del material, para estimar la rugosidad actual de la tubería se determinó mediante la ecuación 7:

$$e_{\text{corr}} = \frac{e + T_{\text{instalacion}} \cdot C_{\text{tiempo}}}{1000}$$

e_{corr} = rugosidad corregida por efectos corrosión interna [m]

La velocidad y el número de Reynolds se calculan con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \qquad \text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

V = velocidad del aire comprimido $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Re = numero de Reynolds

Para hallar el coeficiente de fricción se utilizó la ecuación de Swamee – Jain:

$$f = \frac{0,25}{\log^2 \left[\frac{e_{\text{corr}}}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right]}$$

Mediante la ecuación 6 presentada en la sección 2.7 se calcula la caída de presión en el tramo:

$$\Delta P = 98698 \cdot f \cdot \frac{\dot{Q}^2 \cdot L_{\text{eq}}}{D^5 \cdot P_{\text{pa}}} \cdot 0,00001$$

La caída de presión de este tramo se calculó en 0,9032 bar, un valor por encima de lo recomendado por los expertos.

Para el cálculo del diámetro óptimo se escoge el siguiente diámetro de tubería normalizado (Ver Anexo Y y Z) hasta alcanzar la caída de recomendada, asumiendo que se han corregido las fugas en este tramo. Los datos que cambian con respecto al cálculo anterior son: el caudal, la rugosidad ya que sería tubería nueva y el diámetro de tubería como se muestra a continuación:

$$D = 0,02093 \text{ [m]}$$

$$\dot{Q} = 28 \cdot \left[0,000471947 \cdot \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{CFM}} \right]$$

Con este nuevo diámetro correspondiente a $\frac{3}{4}$ " se obtiene una caída de presión de 0,03121 bar, lo cual se encuentra por debajo del valor recomendado.

Ahora se hace el mismo cálculo pero con tubería de aluminio, se procede a realizar el mismo cálculo pero cambiando la rugosidad de éste material correspondiente a $6,8 \cdot 10^{-7}$. Se tiene una caída de presión correspondiente a 0,02033 bar. Se obtiene un valor más bajo de caída de presión, coherente con los valores de rugosidad de ambos materiales.

A la hora de seleccionar uno u otro material se deben tener en cuenta varios factores: costo inicial, costo de mantenimiento, cambio con el tiempo, resistencia al flujo, duración y calidad, comparando las ventajas y desventajas en cada tipo de material. Las desventajas de la tubería galvanizada es que es más pesada y por ser de acople roscado es más propensa a que se generen fugas, además por la misma composición y expuesta a la intemperie y al cemento se puede corroer y si se quiere hacer una modificación se debe aislar la línea. Sus principales ventajas es que es más económica que la de aluminio y su instalación es sencilla.

La tubería de aluminio es más costosa, pero tiene el inconveniente de que los acoples (codos, uniones) no se deben exponer a temperaturas por encima de los 50°C ya que empieza a deteriorarse la goma con la que se asegura que no abran escapes de aire. La tubería es más liviana que la galvanizada y es más resistente a las condiciones ambientales.

5. ANALISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS PROPUESTAS DE REDISEÑO

El siguiente análisis económico se realiza con el propósito de mostrar el costo de generar el aire comprimido en el estado actual en ambas áreas y contrastarlo con los costos del diseño propuesto, conociendo las inversiones que se deben realizar y ver reflejado la rentabilidad o ahorro posible a la hora de implementar una u otra propuesta. En las propuestas de rediseño a la planta Caracolito se dan a conocer las ventajas que aportan la ejecución de estos trabajos de mejora. Estos aportes económicos para el nuevo diseño se verán reflejados en la calidad del aire comprimido prolongando la vida de los equipo usuarios del aire y en un ahorro de energía gracias a corrección de fugas, calculo adecuado de la caída de presión y el óptimo dimensionamiento de los tanques pulmón.

5.1 COSTOS ACTUALES EN LA RED DE AIRE COMPRIMIDO

En esta parte se resumen todos los costos asociados a la generación del aire comprimido actual para las dos áreas.

En la sección 3.9.1 se presentó el costo de producción de aire comprimido y ahora se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 18. Costo de generación de aire comprimido en las dos áreas.

COSTO FUNCIONAMIENTO COMPRESORES	
AREA	COSTO DE PRODUCCION ANUAL (\$/año)
MOLIENDA DE CEMENTO	435.851.803
EMPAQUE	879.330.902
COSTO TOTAL	1.315.182.705

5.2 AHORROS DEBIDO AL DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES PULMON Y CORRECCION DE FUGAS

Existe una relación entre la cantidad de fugas presentes y el ciclaje de los compresores. Si las fugas presentes en la red son muy grandes los compresores no lograrán aportar el caudal extra para llenar los tanques pulmón y entrar en descarga. Si se corrigen las fugas y los tanques no están bien dimensionados, el compresor entrara en carga y descarga frecuentemente. La corrección de fugas y el correcto dimensionamiento de los tanques van de la mano, ambos influyen en el tiempo en que el compresor entra en vacío reflejando un ahorro en el ahorro del costo de energía. Pero no se debe exceder en el tiempo en que el compresor se encuentra en vacío, ya que un tiempo demasiado largo requiere de tanques pulmón demasiado grande y consumo de energía desaprovechada porque no se comprime aire.

El dimensionamiento del tanque depende del diferencial de presión que queremos mantener en la red y de la duración en que el compresor se encuentra en vacío, los fabricantes recomiendan no un tiempo menor a 1 minuto. A continuación se muestra el ejemplo de cálculo para el área de Cemento.

Mediante la ecuación 2 presentada en la sección 2.6.1 se calcula el tiempo que dura el compresor en carga

$$t_{\text{carga}} = \frac{V \cdot (P_1 - P_2) \cdot 1000}{C_{\text{excem}} \cdot P_{\text{atm}}}$$

V = volumen del tanque nuevo [L]

C_{excem} = Caudal de exceso para el llenado de los tanques $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

t_{carga} = tiempo de duración en carga del compresor [s]

P_1 = presión de entrada en vacío [bar]

P_2 = presión de entrada en carga [bar]

El tiempo de duración del compresor en carga 274,7 segundos. Ahora se calcula el tiempo en que el compresor se encuentra en carga y en vacío en 1 hora mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Ciclo} = \frac{t_{\text{vacío}} + t_{\text{carga}}}{60}$$

$$f_{\text{ciclos}} = \frac{60}{\text{Ciclo}}$$

$$t_{\text{cargaciclo}} = f_{\text{ciclos}} \cdot \frac{t_{\text{carga}}}{60}$$

$$\dot{W}_{\text{vacío}} = kW_{\text{vacío}} \cdot \frac{t_{\text{vacíociclo}}}{60}$$

Nos arroja como resultado que el tiempo en carga durante una hora es de 49,25 minutos y el tiempo en vacío es de 10,75 minutos. Con estos valores podemos hallar el consumo de energía durante 1 hora con las siguientes expresiones:

$$\dot{W}_{\text{carga}} = kW_{\text{carga}} \cdot \frac{t_{\text{cargaciclo}}}{60}$$

$$\dot{W}_{\text{vacío}} = kW_{\text{vacío}} \cdot \frac{t_{\text{vacíociclo}}}{60}$$

\dot{W}_{carga} = potencia en carga [kW]

$\dot{W}_{\text{vacío}}$ = potencia en vacío [kW]

El ahorro se refleja con la diferencia de los compresores 100 % en carga y con la nueva condición del ciclaje de él mismo, se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta_{\text{POT}} = kW_{\text{carga}} - \dot{W}_{\text{carga}} - \dot{W}_{\text{vacío}}$$

$$\text{Costo}_{\text{ahorro}} = \Delta_{\text{POT}} \cdot D_{\text{año}} \cdot H_{\text{día}} \cdot \text{Porcentaje}_{\text{uti}} \cdot \text{Precio}_{\text{kWh}}$$

Δ_{POT} = diferencia entre el 100% y ciclando [kW]

$\text{Costo}_{\text{ahorro}}$ = precio del ahorro considerando el ciclaje [\\$]

$D_{\text{año}}$ = días del año [dia]

H_{dia} = horas del dia [h]

$\text{Porcentaje}_{\text{uti}}$ = porcentaje de utilización del compresor al año

$\text{Precio}_{\text{kWh}}$ = presión del kW [\$/kWh]

El mismo tipo de cálculo se utilizó para el área de empaque, los resultados se muestran en la siguiente tabla x. En el área de cemento tener presente que el solo compresor seis (6) del cuarto principal es capaz de suplir la demanda de aire comprimido, por tal motivo al calculo que se realizó anteriormente se le debe adicionar el ahorro en el consumo de energía de sacar de servicio el compresor Sullair ES-8 y el aire que entregan los otros tres (3) compresores.

Tabla 19. Ahorro en el costo de energía por el ciclaje de los compresores.

AHORRO EN COSTO DE ENERGIA CON EL CICLAJE DE LOS COMPRESORES		
AREA	AHORRO EN EL COSTO DE ENERGIA AL AÑO (\$/año)	AHORRO EN EL COSTO DE ENERGIA AL AÑO (USD/año)
MOLIENDA DE CEMENTO	155.202.198	47.031
EMPAQUE	116.652.156	35.349
AHORRO TOTAL	271.854.354	82.380

Sumando los ahorros que se pueden obtener entre las dos áreas corrigiendo fugas y dimensionando adecuadamente los tanques se tiene un valor estimado en 271'854.354 COP al año.

5.3 COSTOS CORRECCION DE FUGAS DE AIRE COMPRIMIDO

Durante el mes de noviembre y diciembre del 2015 se empezó a corregir las fugas de aire comprimido en las áreas de cemento y empaque. Durante éste tiempo se logró corregir cerca de $\frac{1}{3}$ de las fugas presentes con un costo en consumo de materiales aproximadamente de 3 millones de pesos. Extrapolando estos datos se tiene la hipótesis que la gran mayoría de las fugas serán corregidas en un periodo de 6 meses, los costos asociados a estas correcciones se muestran a continuación:

- Costo mano de obra: 12'000.000 COP
- Costo de materiales: 15'000.000 COP

5.4 COSTOS DEL REDISEÑO PROPUESTO

El análisis económico permite ver en más detalle la rentabilidad de las diferentes opciones de rediseño, discriminando los costos de inversión de las alternativas y los ahorros que se verán ahora como ingresos en el tiempo.

5.4.1 Tratamiento del aire comprimido. El área que solo necesita tratamiento de aire comprimido es el área de Cemento, se analizaron dos alternativas con un secador frigorífico y con un sistema de refrigerador y filtro de pastillas desecante. En las siguientes tablas se muestran los costos de las dos alternativas, IVA incluido 16%.

Tabla 20. Costos alternativa con secador refrigerativo

ALTERNATIVA 1				
ITEM	MARCA	DESCRIPCION	MODELO	COSTO (USD)
1	KAESER	SECADOR REFRIGERATIVO	TG 301 E	20461
2	ATLAS COPCO	SECADOR REFRIGERATIVO	FD 510	18792
3	KAITEC	SECADOR REFRIGERATIVO	KSAD 1200	14339

Tabla 21. Costos alternativa con refrigerador y filtro desecante

ALTERNATIVA 2				
ITEM	MARCA	DESCRIPCION	MODELO	COSTO TOTAL (USD)
1	VAN AIR SYSTEM	REFRIGERADOR AIRE - AIRE	AC- 170-7	7395
2	VAN AIR SYSTEM	FILTRO DESECANTE	D-36	13410

En la siguiente tabla se muestran los filtros separadores de condensado y los separadores de partículas y aceites, IVA incluido 16%.

Tabla 22. Costos filtros separadores de condensados y desoleadores

FILTROS SEPARADORES Y DESOLEADORES				
ITEM	MARCA	DESCRIPCION	MODELO	COSTO (USD)
1	KAESER	FILTRO SEPARADOR DE CONDENSADOS	KFS 1000	2279,4
2	KAESER	FILTRO SEPARADOR DE ACEITES	KOR 1000	2279,4
3	ATLAS COPCO	FILTRO SEPARADOR DE CONDENSADOS	DD 520	2088
4	ATLAS COPCO	FILTRO SEPARADOR DE ACEITES	PD 520	2088

Cada equipo en donde se condense la humedad debe colocarse un drenaje ya sea manual o automático para la correcta depuración del líquido. El drenaje manual tiene 2 grandes inconvenientes: periódicamente debe ir una persona a purgar los equipos y durante este procedimiento puede desperdiciar aire comprimido, por tal motivo se escogió el drenaje automático. En la siguiente tabla se muestra su costo, IVA incluido del 16%.

Tabla 23. Costo del drenaje automático

MARCA	DESCRIPCION	COSTO USD
KAESER	AMD1550	228
ATLAS COPCO	EWD 330	754

5.4.2 Tanques de aire comprimido. La adquisición de un tanque de aire comprimido debe cumplir con alguna norma certificada para recipientes a presión. Kaeser y Atlas Copco construyen sus tanques a presión bajo la norma Europea AD 2000. Otras normas que pueden diseñar los fabricantes son la ASME Sección VIII y el Reglamento español de recipientes a presión en el Real Decreto 769/1999 en el artículo ITC-MIE-AP-17: Instalaciones de Tratamiento y Almacenamiento de Aire Comprimido. La marca Kaitec no se acoge a ninguna norma, solo expide un test de prueba hidrostático. En la siguiente tabla se asocian los precios de diferentes volúmenes de almacenamiento, IVA incluido 16%.

Tabla 24. Costos tanques aire comprimido

TANQUES DE AIRE COMPRIMIDO			
ITEM	MARCA	DESCRIPCION	COSTO (USD)
1	KAESER	TANQUE 1000 L	2951
2	KAESER	TANQUE 2000 L	5140
3	ATLAS COPCO	TANQUE 1000 L	2204
4	ATLAS COPCO	TANQUE 2000 L	3642
5	KAITEC	TANQUE 1000 L	1964
6	KAITEC	TANQUE 2000 L	3854

5.4.3 Costo de tuberías y accesorios. Para ésta sección se tiene el costo para los dos tipos de materiales usados en el rediseño, tubería de acero galvanizado, calibre 40, Norma ASTM – A53 y tubería de acero anodizado que cumpla con las normas, NTC 5359, ASTM B241 o ASME B31. En las siguientes tablas se encuentran los costos de la tubería y de los accesorios para ambos materiales. Incluye IVA del 16%.

Tabla 25. Costo tubería en acero galvanizado para el área de cemento

COSTOS TUBERIA GALVANIZADA AREA CEMENTO			
DIAMETRO (INCH)	CANTIDAD (m)	COSTO UNITARIO (\$/6m)	COSTO TOTAL (\$)
3/4	42	48.000	336.000
1	42	67.448	472.136
1 1/2	36	117.033	702.198
2 1/2	18	298.454	895.362
3	66	349.990	3.849.890
TOTAL			6.255.586

Fuente: Ferretería Reina

Tabla 26. Costo tubería en aluminio para el área de cemento

COSTOS TUBERIA DE ALUMINIO AREA CEMENTO			
DIAMETRO (mm)	CANTIDAD (m)	COSTO UNITARIO (\$/6m)	COSTO TOTAL (\$)
19	54	90.480	814.320
25	36	125.280	751.680
42	36	222.720	1.336.320
63	78	348.000	4.524.000
TOTAL			7.426.320

Fuente: Ingeneumatica

Tabla 27. Costo de accesorios en acero galvanizado para el área de cemento

COSTOS ACCESORIOS GALVANIZADO AREA CEMENTO			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
CODO 90° 3/4" R=d	14	1.855	25.970
CODO 90° 1" R=d	14	2.879	40.306
CODO 90° 1 1/2" R=d	17	5.752	97.784
CODO 90° 2 1/2" R=d	3	17.883	53.649
CODO 90° 3" R=d	8	23.019	184.152
TEE 3/4"	2	2.366	4.732
TEE 1"	2	3.775	7.550
TEE 1 1/2"	2	7.227	14.454
TEE 3"	1	30.240	30.240
UNION 3/4"	2	8.252	16.504
UNION 1"	6	12.145	72.870
UNION 1 1/2"	11	21.576	237.336
UNION 2 1/2"	4	51.388	205.552
VALVULA BOLA 3/4"	2	10.256	20.512
VALVULA BOLA 1"	5	15.506	77.530
VALVULA BOLA 1 1/2"	6	34.349	206.094
VALVULA BOLA 2 1/2"	3	117.856	353.568
BUSHING 1" - 3/4"	4	1.752	7.008
BUSHING 1 1/2" - 1"	4	3.260	13.040
BUSHING 2" - 1 1/5"	4	5.510	22.040
BUSHING 2 1/2" - 2"	4	10.022	40.088
BUSHING 3" - 2 1/2"	4	14.384	57.536
		TOTAL	1.788.515

Fuente: Ferretería Reina

Tabla 28. Costo de accesorios en aluminio para el área de cemento

COSTOS ACCESORIOS ALUMINIO AREA CEMENTO			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
CODO 90° 19mm R=d	12	29.000	348.000
CODO 90° 25mm R=d	16	30.160	482.560
CODO 90° 42mm R=d	13	91.640	1.191.320
CODO 90° 63mm R=d	9	129.920	1.169.280
TEE 19mm	2	34.800	69.600
TEE 25mm	2	35.960	71.920
TEE 42mm	2	134.560	269.120
TEE 63mm	1	170.520	170.520
VALVULA BOLA 3/4"	9	10.256	92.304
VALVULA BOLA 1"	4	15.506	62.024
VALVULA BOLA 1 1/2"	2	34.349	68.698
VALVULA BOLA 2 1/2"	3	117.856	353.568
NIPLE TUERCA 19mm	18	9.280	167.040
NIPLE TUERCA 25mm	8	15.080	120.640
NIPLE TUERCA 42mm	4	20.880	83.520
NIPLE TUERCA 63mm	6	32.480	194.880
BUSHING 1" - 3/4"	4	1.752	7.008
BUSHING 1 1/2" - 1"	4	3.260	13.040
BUSHING 2" - 1 1/5"	4	5.510	22.040
BUSHING 2 1/2" - 2"	4	10.022	40.088
BUSHING 3" - 2 1/2"	4	14.384	57.536
		TOTAL	5.054.706

Fuente: Ingeneumatica

Tabla 29. Costo tubería en acero galvanizado para el área de empaque

COSTOS TUBERIA GALVANIZADA AREA EMPAQUE			
DIAMETRO (INCH)	CANTIDAD (m)	COSTO UNITARIO (\$/6m)	COSTO TOTAL (\$)
1	72	67.448	809.376
1 1/2	120	117.033	2.340.660
2	144	150.539	3.612.936
2 1/2	24	298.454	1.193.816
4	54	517.046	4.653.414
		TOTAL	12.610.202

Fuente: Ferretería Reina

Tabla 30. Costo tubería en aluminio para el área de empaque

COSTOS TUBERIA DE ALUMINIO AREA EMPAQUE			
DIAMETRO (mm)	CANTIDAD (m)	COSTO UNITARIO (\$/6m)	COSTO TOTAL (\$)
19	36	90.480	542.880
25	18	125.280	375.840
42	150	222.720	5.568.000
63	252	348.000	14.616.000
110	42	800.400	5.602.800
		TOTAL	26.705.520

Fuente: Ingeneumatica

Tabla 31. Costo de accesorios en acero galvanizado para el área de empaque

COSTOS ACCESORIOS GALVANIZADO AREA EMPAQUE			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
CODO 90° 1" R=d	32	2.879	92.128
CODO 90° 1 1/2" R=d	29	5.752	166.808
CODO 90° 2" R=d	36	8.630	310.680
CODO 90° 2 1/2" R=d	2	17.883	35.766
CODO 90° 3" R=d	8	23.019	184.152
CODO 90° 4" R=d	8	41.749	333.992
TEE 1"	2	3.775	7.550
TEE 1 1/2"	2	7.227	14.454
TEE 2"	1	10.807	10.807
TEE 3"	1	30.240	30.240
TEE 4"	1	54.667	54.667
UNION 1"	1	12.145	12.145
UNION 1 1/2"	4	21.576	86.304
UNION 2"	5	32.364	161.820
VALVULA BOLA 1"	2	15.506	31.012
VALVULA BOLA 1 1/2"	3	34.349	103.047
VALVULA BOLA 2"	6	53.124	318.744
VALVULA BOLA 2 1/2"	3	117.856	353.568
VALVULA BOLA 4"	2	270.869	541.738
BUSHING 1" - 3/4"	4	1.752	7.008
BUSHING 1 1/2" - 1"	4	3.260	13.040
BUSHING 2" - 1 1/5"	4	5.510	22.040
BUSHING 2 1/2" - 2"	4	10.022	40.088
BUSHING 3" - 2 1/2"	4	14.384	57.536
TOTAL			2.989.334

Fuente: Ferretería Reina

Tabla 32. Costo de accesorios en aluminio para el área de empaque

COSTOS ACCESORIOS ALUMINIO AREA CEMENTO			
ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
CODO 90° 19mm R=d	20	29.000	580.000
CODO 90° 25mm R=d	15	30.160	452.400
CODO 90° 42mm R=d	47	91.640	4.307.080
CODO 90° 63mm R=d	25	129.920	3.248.000
CODO 90° 110mm R=d	5	212.280	1.061.400
TEE 25mm	1	35.960	35.960
TEE 42mm	3	134.560	403.680
TEE 63mm	6	170.520	1.023.120
VALVULA BOLA 1"	2	15.506	31.012
VALVULA BOLA 1 1/2"	3	34.349	103.047
VALVULA BOLA 2"	6	53.124	318.744
VALVULA BOLA 4"	2	270.869	541.738
VALVULA BOLA 2 1/2"	3	117.856	353.568
NIPLE TUERCA 25mm	4	15.080	60.320
NIPLE TUERCA 42mm	6	20.880	125.280
NIPLE TUERCA 63mm	6	32.480	194.880
NIPLE TUERCA 110mm	4	45.240	180.960
BUSHING 1" - 3/4"	4	1.752	7.008
BUSHING 1 1/2" - 1"	4	3.260	13.040
BUSHING 2" - 1 1/5"	4	5.510	22.040
BUSHING 2 1/2" - 2"	4	10.022	40.088
BUSHING 3" - 2 1/2"	4	14.384	57.536
TOTAL			13.160.901

Fuente: Ingeneumatica

A los costos presentados en las tablas anteriores se les debe adicionar un 20% del costo total de la tubería y accesorios para el montaje y un 10% para efectos de imprevistos. El costo total de cada instalación se presenta en la tabla 34 y 35.

Tabla 33. Costo total de la instalación en acero galvanizado para ambas áreas

COSTOS INSTALACIÓN EN ACERO GALVANIZADO				
AREA	COSTO TUBERIA (\$)	COSTO ACCESORIOS (\$)	MONTAJE E IMPREVISTOS	COSTO TOTAL
CEMENTO	6.255.586	1.788.515	2.413.230	10.457.331
EMPAQUE	12.610.202	2.989.334	4.679.861	20.279.397

Tabla 34. Costo total de la instalación en aluminio para ambas áreas

COSTOS INSTALACIÓN EN ALUMINIO				
AREA	COSTO TUBERIA (\$)	COSTO ACCESORIOS (\$)	MONTAJE E IMPREVISTOS	COSTO TOTAL
CEMENTO	7.426.320	5.054.706	3.744.308	16.225.334
EMPAQUE	26.705.520	13.160.901	11.959.926	51.826.347

5.4.4 Costo debido a la ventilación de los cuartos de compresores. Es importante la correcta ventilación de los cuartos de compresores para evitar problemas de sobrecalentamiento e impedir que los compresores vayan a falla por temperatura, además tener un ambiente fresco en las salas ayuda a mejorar la eficiencia de los refrigeradores que vienen dentro de la misma unidad compresora.

En la siguiente tabla se encuentra relacionado la cantidad de extractores que se deben instalar de más en cada cuarto con sus respectivos costos, IVA incluido del 16%.

Tabla 35. Costos de los extractores de aire para los cuartos de compresores de ambas áreas.

COSTOS EXTRACTORES DE AIRE EN LOS CUARTOS DE COMPRESORES				
CANTIDAD	AREA	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
5	CUARTO PRINCIPAL	EXTRACTOR DE 500mm DE DIAMETRO CON CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE 2,93 m3/s CONSUMIENDO UNA POTENCIA DE 0,66 Kw	1.294.000	7.505.200.000
4	CUARTO DE EMPAQUE	EXTRACTOR DE 500mm DE DIAMETRO CON CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE 2,93 m3/s CONSUMIENDO UNA POTENCIA DE 0,66 Kw	1.294.000	6.004.160.000
TOTAL				13.509.360.000

5.5 ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE MEJORA

Para realizar el análisis de las alternativas de mejora primero se deben saber cuáles serán las opciones propuestas para el rediseño de la red. Puesto que existen varios factores para el rediseño, cada diferente factor podría ser una opción distinta de mejora, por tal motivo se presentarán 4 alternativas de rediseño por área que son las siguientes:

- Tratamiento del aire comprimido
 - Secador frigorífico
 - Refrigerador aire-aire con filtro desecante
- Material tubería
 - Acero galvanizado
 - Aluminio

Para el análisis de las diferentes alternativas de mejora se calculó el tiempo de retorno de la inversión o payback para hacernos una idea del tiempo aproximado en que se tardará en recuperarse la inversión y por medio de la Tasa Interna de Retorno que los rendimientos futuros de dicha inversión (Ver Anexo AA). En la siguiente tabla se resume el análisis del costo beneficio de las diferentes alternativas para las dos áreas.

Tabla 36. Análisis costo – beneficio de las diferentes alternativas

CEMENTO			
ALTERNATIVA	DESCRIPCION	PAYBACK	TIR
1	SECADOR FRIGORIFICO - TUBERIA GALVANIZADA	1,25	80%
2	REFRIGERADOR Y FILTRO - TUBERIA GALVANIZADA	1,66	60%
3	SECADOR - TUBERIA DE ALUMINIO	1,29	77%
4	REFRIERADOR Y FILTRO - TUBERIA DE ALUMINIO	1,71	58%

EMPAQUE			
ALTERNATIVA	DESCRIPCION	PAYBACK	TIR
1	TUBERIA GALVANIZADA	1,23	81%
2	TUBERIA DE ALUMINIO	1,50	66%

Con los resultados del estudio de rentabilidad realizado anteriormente se pudo establecer que en el área de cemento la alternativa 1 es la mejor de las 4 con el tiempo de retorno de la inversión más bajo y con la rentabilidad más alta, igualmente en el área de empaque la alternativa 1 es la más atractiva. En ambos casos se recuperara la inversión en 1 año y 3 meses.

6. CONCLUSIONES

En el diagnóstico realizado a la red de aire comprimido de las áreas de Cemento y Empaque se encontraron grandes problemas que revelan la falta de estudio y de mantenimiento de la red. Las dos áreas comparten 2 grandes problemas: excesiva cantidad de fugas por encima del 8% del máximo admisible, y caídas de presión por encima de lo recomendable. Se observó que las áreas han aumentado su demanda de aire y con ello se instalaron compresores de más capacidad, pero no se estudió la ampliación de la tubería provocando así, una ineficiente distribución del aire comprimido y ocasionando un trabajo adicional del compresor para suplir estos problemas, adicionalmente el área de Cemento presenta un deficiente sistema de tratamiento del aire comprimido. Las fugas de aire comprimido llegan a valores irrisorios, más del 40% del aire comprimido se pierde por fugas en el área de Cemento y más del 20% para el área de empaque.

La planta no cuenta con planos isométricos o diagramas de la distribución del aire comprimido. Con la realización de estos diagramas de la red de aire comprimido para ambas áreas se logró visualizar como se encuentran las redes de distribución. Se encontraron grandes irregularidades especialmente en el área de Cemento, algunas de ellas son: la línea de distribución que más demanda de aire tiene es la línea que menor diámetro posee, gran cantidad de reducciones de diámetros y accesorios y se tiene solo un tanque pulmón de 1000 L para suministrarle aire a 8 filtros de mangas, entre los que se encuentran los de mayor consumo de aire comprimido. Con estos diagramas y sus respectivos cálculos se determinó que la tubería de $\frac{1}{2}$ " de diámetro es la que presenta mayor caída de presión.

Por medio del cálculo de consumos de las áreas se determinó que ningún compresor se encuentra realizando su trabajo de ciclaje debido a la presencia de fugas, sin embargo, si se corrigen o se llevan al mínimo admisible, los compresores entrarían a trabajo en vacío, pero no el tiempo que recomienda el fabricante, esto se debe a que los tanques pulmón no están debidamente dimensionados para mantener la presión hasta el mínimo posible durante aproximadamente 60 segundos. Este tiempo en vacío se traduce en un consumo de energía en aproximadamente 80% menos del consumo como si estuvieran trabajando en carga, lo que conlleva a un ahorro importante no solo en consumo eléctrico, disminuiría el desgaste interno del compresor y por ende la frecuencia de los mantenimientos.

Una vez encontrado los problemas, se hicieron los cálculos pertinentes para dar solución a los inconvenientes que se vienen presentando en las dos áreas. La primera propuesta de rediseño fue el cálculo de las dimensiones adecuadas de los tanques pulmón y su ubicación en las diferentes áreas. La segunda propuesta es el material utilizado para el adecuado dimensionamiento de la tubería de la red de aire comprimido, en este proyecto se estudiaron 2 tipos de materiales, la tubería convencional de acero galvanizado y la tubería de aluminio. La tercera propuesta de rediseño implica solo al área de cemento, y tiene que ver con el tratamiento del aire comprimido, se analizaron dos tipos de deshumidificación del aire comprimido: secador frigorífico o el conjunto de refrigerador aire –aire y filtro desecante.

Tomando como punto en común para las dos áreas la adquisición e instalación de los nuevos volúmenes de tanques, se hizo el análisis económico para verificar cuál de las otras dos propuestas es la más rentable para la implementación del proyecto. Para este análisis se calculó el tiempo de retorno de la inversión y la

rentabilidad de cada alternativa, dando como resultado, para el área de cemento, la alternativa con el secador frigorífico y tubería galvanizada, y para el área de empaque el cambio de tubería en acero galvanizado.

Para el nuevo rediseño de la red de aire comprimido para el área de cemento se tiene una inversión de 60.000 USD correspondiente a la adquisición de tanques pulmón, tubería y accesorios de acero galvanizado, purgas automáticas, corrección de fugas y ventilación de la sala de compresores, la inversión se recuperaría en 1 año y 2 meses. En cuanto al área de empaque con una inversión de 53.000 USD correspondiente a drenajes automáticos, ventilación de la sala y adquisición de tanques pulmón y tubería galvanizada también la inversión se recuperaría en 1 año y 3 meses. Aunque el costo inicial es bastante alto, el tiempo de recuperación es bastante corto. Son implementaciones necesarias para la planta Caracolito para disminuir sus costos de producción, además se asegura una expansión del 20%, si en un futuro se desea aumentar la producción.

7. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

Disponer de planos isométricos de la red de aire comprimido de cada área y mantener un registro de los accesorios y demás elementos que se encuentran en cada tramo con el fin de minimizar los tiempos de mantenimiento.

Se recomienda realizar el mantenimiento periódico a la red de aire comprimido, por lo menos cada 6 meses se debe hacer el recorrido completo con la pistola de ultrasonido por las dos áreas a fin de buscar nuevas fugas y programar su corrección, ya que es más económico corregirla que dejar la fuga.

Para garantizar la disponibilidad del servicio del aire comprimido, se recomienda colocar una línea en paralelo con un compresor no menor a la capacidad actual, con el fin de que si se presenta alguna eventualidad seguir suministrando el aire comprimido.

Para garantizar la calidad del aire comprimido, se sugiere colocar una línea alterna a la principal con igual número y modelo de los equipos de tratamiento del aire, puede que ésta recomendación sea costosa, entonces se podría colocar unos equipos de menor capacidad, ya que es mejor tener el aire algo tratado a tenerlo sin ningún tipo de tratamiento.

No se deben realizar nuevas líneas de consumo sin hacer el cálculo pertinente para su adecuado diámetro y verificando que la línea tenga la menor longitud y menor número de accesorios.

Se recomienda colocar un equipo de tratamiento de condensados. Cada drenaje expulsa los contaminantes del aire comprimido especialmente el aceite que es un contaminante bastante peligroso para el medio ambiente, se sugiere los equipos Aquamat de Kaeser u OSC de Atlas Copco.

Se sugiere instalar manómetros y caudalímetros a las entradas de cada equipo, con el fin de poder ver el comportamiento de la red y a la hora de hacer la revisión sea más fácil detectar alguna anomalía.

Se recomienda cambiar la conexión de salida del tanque pulmón principal del área de Cemento, ya que la conexión normal es por la parte superior del tanque para que los condensados se decanten en la parte inferior y puedan ser expulsados.

BIBLIOGRAFIA

MALPICA, Deidri Beatriz y ASCENCIO Walter Oswaldo. Evaluación, rediseño y optimización de distribución de aire comprimido en la empresa CEMEX S.A. en San Jose de Cúcuta. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico, San José de Cúcuta, Universidad Francisco de Paula Santander. Facultad de Ingeniería. Plan de Estudios de Ingeniería Mecánica, 2013.

Atlas Copco; Manual del Aire Comprimido 2011; Séptima Edición; 2011

Kaeser Compresores; Seminario de Aire Comprimido; Primera Edición; 2013

CAGI; Compressed Air and Gas Handbook. [Artículo de internet]. <http://www.cagi.org/education/handbook.aspx>.

E. Carnicer Royo; Aire Comprimido Teoría y cálculo de las instalaciones; Segunda Edición; 1994.

FESTO; Fundamentos de Neumática. [Artículo de internet]. <http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/0598048001156321794.pdf>

Rocha Felices Arturo; Hidráulica de Tuberías y Canales; [Artículo de Internet]; <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/130881/44ff222d47336fc5bba76b496bf68747.pdf?sequence=1>