



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CILINDROS Y
VÁLVULAS NEUMÁTICAS QUE OPERAN EN UNA FÁBRICA DE CONCENTRADOS
PARA ANIMALES, DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, CON EL FIN
DE MINIMIZAR PAROS DE PRODUCCIÓN**

Francisco Daniel Juárez Estrada

Asesorado por el Msc. Ing. Otto Miguel Hurtarte Hernández

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CILINDROS Y
VÁLVULAS NEUMÁTICAS QUE OPERAN EN UNA FÁBRICA DE CONCENTRADOS
PARA ANIMALES, DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, CON EL FIN
DE MINIMIZAR PAROS DE PRODUCCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANCISCO DANIEL JUÁREZ ESTRADA

ASESORADO POR EL MSC. ING. OTTO MIGUEL HURTARTE HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Anacleto Medina Gómez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CILINDROS Y VÁLVULAS NEUMÁTICAS QUE OPERAN EN UNA FÁBRICA DE CONCENTRADOS PARA ANIMALES, DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, CON EL FIN DE MINIMIZAR PAROS DE PRODUCCIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de julio de 2013.



Francisco Daniel Juárez Estrada



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

AGS-MGIPP-0002-2014

Guatemala, 23 de enero de 2014.

Director
 Julio César Campos Paiz
 Escuela de Ingeniería Mecánica
 Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Francisco Daniel Juárez Estrada** carné número **93-12223**, quien optó la modalidad del **“PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO”**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Gestión Industrial**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

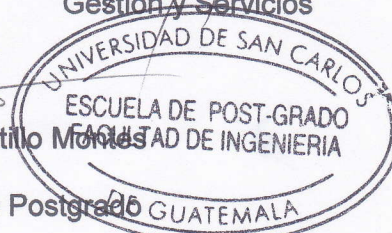
“Id y enseñad a todos”

MSc. Ing. Otto Miguel Hurtarte Hernández
 Asesor (a)

Ingeniero Electricista
 Otto Miguel Hurtarte Hernández
 Col. 3329

MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
 Coordinador de Área
 Gestión y Servicios

Dra. Mayra Virginia Castillo
 Directora
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
 /la



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecánica.38.2014
Guatemala 26 de febrero de 2014

Ingeniero
Hugo Humberto Rivera Pérez
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Rivera:

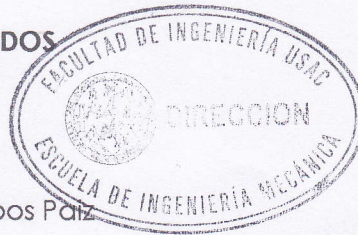
De manera atenta le informo que el estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, **Francisco Daniel Juárez Estrada**, carnet No. **9312223**, ha cumplido con el proceso de graduación de Licenciatura, mediante la modalidad "Estudio de Postgrado" presentando a esta Dirección su trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CILINDROS Y VÁLVULAS NEUMÁTICAS QUE OPERAN EN UNA FÁBRICA DE CONCENTRADOS PARA ANIMALES, DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, CON EL FIN DE MINIMIZAR PAROS DE PRODUCCIÓN**, asesorado por el MSc. Ing. Otto Miguel Hurtarte Hernández y aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrados.

Por mi parte doy mi visto bueno para continuar con el procedimiento correspondiente.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio Cesar Campos Paiz
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo
JC/mjm

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG.093.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CILINDROS Y VÁLVULAS NEUMÁTICAS QUE OPERAN EN UNA FÁBRICA DE CONCENTRADOS PARA ANIMALES, DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, CON EL FIN DE MINIMIZAR PAROS DE PRODUCCIÓN,** presentado por el estudiante universitario: **Francisco Daniel Juárez Estrada,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 26 de febrero de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador y formador del universo por guiarme e iluminar cada uno de mis pasos durante mi vida.
Mis padres	Francisco Daniel Juárez Sánchez y Sandra Catalina Estrada Castillo, por ser un ejemplo en mi vida.
Mi hermano	Arq. Mario Alejandro Juárez, por ser un ejemplo en el desarrollo profesional.
Mi novia	Beyda Suzett Hernández con amor.
Mi abuela	Catalina Castillo Galicia (q.e.p.d.), con mucho cariño.
Mi tía	Ana María Juárez por su cariño y precio.
Familia Estrada López	Por su apoyo y amistad.
Familia Estrada Armas	Especialmente a Julio Roberto y Federico Guillermo Estrada, esperando que este logro les sirva de ejemplo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, que me formó profesionalmente.

**Facultad de
Ingeniería**

Por brindarme conocimientos y experiencia que me permitieron desarrollarme como una persona de éxito.

**Escuela de Estudios de
Postgrado de la Facultad
de Ingeniería**

Por brindarme conocimientos para el crecimiento profesional.

**Mis amigos de la
Universidad**

Por todas las vivencias compartidas desde que empezamos esta aventura, por motivarme cada día para cumplir mis metas y por su valiosa amistad.

**Mis amigos de la
Maestría en Gestión
Industrial**

Cohorte décima B, por su amistad, por el apoyo que me han brindado para poder alcanzar la meta.

Mi asesor

Msc. Ing. Otto Miguel Hurtarte Hernández, por su asesoría, valiosos consejos, apoyo y amistad.

.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANTECEDENTES	01
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	03
2.1. Planteamiento del problema	03
2.2. Formulación del problema	04
3. JUSTIFICACIÓN	05
4. OBJETIVOS	07
5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	09
6. ALCANCES.....	11
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	13
7.1. Fundamentos físicos	14
7.2. La presión y sus unidades	19
7.3. Calidad del aire comprimido	20
7.3.1. Parámetros de la calidad del aire comprimido	22

7.3.2.	Partículas sólidas	23
7.3.3.	La humedad en el aire comprimido	24
7.3.4.	Punto de rocío	25
7.3.5.	El punto de condensación	25
7.3.6.	La humedad del aire.....	26
	7.3.6.1. Humedad máxima del aire	26
	7.3.6.2. Humedad absoluta del aire	26
7.4.	Preparación del aire comprimido.....	27
	7.4.1. Procedimiento de secado.....	32
	7.4.2. Filtración.....	34
	7.4.2.1. Clasificación de los filtros	34
	7.4.3. Lubricadores.....	35
	7.4.4. Unidades de mantenimiento.....	36
7.5.	Cilindro neumático.....	40
	7.5.1. Consumo de aire en cilindros	41
	7.5.2. Criterios para el montaje	42
7.6.	Válvulas neumáticas	42
7.7.	Vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas	44
7.8.	Mantenimiento.....	47
	7.8.1. Mantenimiento correctivo	48
	7.8.2. Mantenimiento preventivo	49
	7.8.3. Mantenimiento predictivo.....	51
	7.8.4. Cálculo de la mano de obra necesaria para el mantenimiento.....	53
7.9.	Inventario de repuestos.....	53
	7.9.1. Inventario de repuestos en el mantenimiento.....	54
	7.9.2. Costos ocultos en el inventario de repuestos.....	55
	7.9.3. Manejo de inventario de mantenimiento.....	56
	7.9.4. Modelo EOQ (tamaño de lote económico)	56

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	59
9.	METODOLOGÍA	63
9.1.	Variables e indicadores	63
9.2.	Fase 1: observación	64
9.3.	Fase 2: análisis del aire comprimido.....	66
9.4.	Fase 3: tratamiento del aire	67
9.5.	Fase 4: evaluación de los cilindros y las válvulas.....	70
9.6.	Fase 5: datos estadísticos de recambio de piezas	71
9.7.	Fase 6: comparación de datos	72
9.8.	Fase 7: análisis de costos	72
9.9.	Fase 8: análisis de fugas y aumento de eficiencia energética.....	73
9.10.	Muestreo.....	73
9.10.1.	Tamaño de la muestra.....	74
9.11.	Realizar un diagnóstico de la situación actual	74
10.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	75
10.1.	Recursos	76
10.1.1.	Humanos	76
10.1.2.	Institucionales	76
11.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	77
12.	RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS	79
13.	BIBLIOGRAFÍA	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Continuidad de los fluidos	16
2.	Flujo laminar y flujo turbulento.....	18
3.	Contaminantes del aire.....	21
4.	Esquema de red neumática.....	27
5.	Tamaño de partículas en el aire	30
6.	Lubricador de aire comprimido	36
7.	Unidad de mantenimiento modular.....	37
8.	Cilindro neumático.....	42
9.	Costos de mantenimiento.....	52
10.	Modelo EOQ.....	57
11.	Distribución del aire comprimido.....	65
12.	Diagrama de red del aire comprimido.....	65
13.	Tratamiento del aire comprimido	69
14.	Secado del aire comprimido	70
15.	Daños en válvulas neumáticas.....	71
16.	Experiencias con humedad	71
17.	Gráfico de costos de mantenimiento	73
18.	Cronograma de actividades.....	77

TABLAS

I.	Propiedades físicas del aire	29
II.	Calidad del aire según sus impurezas.....	31

III.	Estado normalizado ISO 554	32
IV.	Contenido de vapor de agua.....	33
V.	Vida útil de las válvulas Festo.....	45
VI.	Vida útil de los cilindros Festo en km.....	46
VII.	Vida útil de los cilindros Festo en ciclos.....	47
VIII.	Variables e indicadores.....	64
IX.	Norma DIN ISO 8573-1.....	67
X.	Norma ISO 8573-1:2010.....	68
XI.	Clases de calidad del aire.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
Kw	Kilowatt
\geq	Mayor o igual que
$<$	Menor
\leq	Menor o igual que
μ	Micro
m	Mili
%	Porcentaje
P	Presión
+	Suma

GLOSARIO

Aire	Mezcla gaseosa que forma la atmósfera en la tierra.
Calidad	Es una herramienta básica para una propiedad inherente de cualquier cosa que permite que ésta sea comparada con cualquier otra de su misma especie y que tienen la capacidad de satisfacer necesidades implícitas o explícitas.
Cilindro	Dispositivo neumático que produce movimientos utilizando la energía del aire comprimido.
Eficiencia	Es la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un objetivo determinado con el mínimo de recursos posibles viables.
Mantenimiento correctivo	Es el mantenimiento que se realiza posterior a que ocurra la falla.
Mantenimiento preventivo	Es el mantenimiento que se realiza antes que ocurra una falla.
Unidad de mantenimiento	Dispositivo neumático cuya función es filtrar, regular, purgar y lubricar el aire comprimido.

Válvula

Dispositivo neumático por medio de la cual el aire comprimido circula y se direcciona para producir movimiento en los cilindros.

RESUMEN

Las empresas actualmente buscan la manera de optimizar los procesos y operaciones haciendo uso eficiente de la tecnología y la estandarización de los mismos, para ello es necesario implementar metodologías que permitan obtener los resultados deseados, tales como la reducción de los desperdicios, reducción de costos, optimizar los niveles y tiempos de producción.

La presente investigación se refiere a la implementación del análisis del aire atmosférico del departamento de Escuintla, al análisis de datos experimentales de la frecuencia de fallas de los equipos neumáticos, el análisis de pronósticos y la gestión de mantenimiento predictivo con el fin de optimizar los recursos y minimizar los paros inesperados de producción.

El estudio será aplicado en diferentes plantas que operan con circuitos neumáticos en el departamento de Escuintla. La implementación inicia con un diagnóstico de la situación actual, en el caso de la implementación de mantenimientos correctivos y se elaborará un Diagrama de Causa y Efecto con el objetivo de determinar el problema a resolver. Posteriormente se determinará la metodología adecuada para el tratamiento del aire comprimido para obtener una buena calidad que cumpla con la norma DIN ISO 8573-1.

Con la información obtenida se implementarán modelos matemáticos que determinen la vida útil de los componentes neumáticos, la cual será utilizada para pronosticar adecuadamente las rutinas de mantenimiento predictivo. Con estas rutinas será posible implementar la gestión de compras, la gestión de

inventarios y la planeación de la producción. Lo anterior con el objetivo de optimizar los recursos.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se refiere al diseño de la investigación de la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas que operan en el departamento de Escuintla, en la planta de producción de concentrado de animales Areca, con el fin de optimizar los recursos y evitar los paros inesperados de producción provocados por las fallas en los equipos neumáticos debidos a la deficiente calidad del aire comprimido. La optimización se realizará por medio de demostraciones matemáticas y por medio del análisis de datos estadísticos.

La característica principal del aire atmosférico de Escuintla es que contiene un alto contenido de humedad relativa y contaminante, la cual produce un aire comprimido que daña prematuramente los equipos neumáticos, por lo que es necesario el estudio del tratamiento adecuado del aire comprimido. En la actualidad la industria guatemalteca que se encuentra en crecimiento está emigrando con sus instalaciones y plantas de producción hacia la costa sur, por lo que se invierte gran cantidad de recursos en el recambio de piezas neumáticas que fallan antes de alcanzar su vida útil dada por los fabricantes.

En el capítulo 1, se describirán los aspectos generales del aire atmosférico del departamento de Escuintla, sus propiedades y características. Se evaluará la calidad del aire por medio de las normas DIN ISO.

En el capítulo 2, se desarrollará una propuesta de implementación del tratamiento adecuado del aire comprimido con el objetivo de cumplir estrictamente la Norma DIN ISO 8573-1 para optimizar la vida útil de los

componentes neumáticos, aumentar la eficiencia y productividad de las empresas.

En el capítulo 3, se determinará la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas por medio de modelos matemáticos, utilizando la metodología de los pronósticos se determinarán los planes de mantenimiento preventivo en los circuitos neumáticos.

En el capítulo 4, se presentarán los resultados obtenidos con la implementación de la gestión de mantenimientos preventivos. Se compararán los costos de la implementación de mantenimiento correctivo versus el mantenimiento preventivo.

En el capítulo 5, se determinará la forma adecuada de localizar y eliminar las fugas, para evitar un gasto energético innecesario en el compresor, lo que provoca una disminución de la productividad.

Se presentarán los resultados en el capítulo 6, con los cuales se podrán tomar acciones que eliminen todos los factores que disminuyen la vida útil de los elementos neumáticos, para disminuir los paros de producción.

En el capítulo 7, se estudiará el aumento de la productividad que se obtiene al optimizar la vida útil de los elementos neumáticos y al disminuir el consumo de aire comprimido al implementar acciones correctivas en las fugas y en los diseños de los circuitos neumáticos.

1. ANTECEDENTES

En el departamento de Escuintla se mantiene un monitoreo constante de la calidad del aire atmosférico por parte del Insivumeh, el cual tiene datos periódicos acerca de la cantidad de partículas sólidas en suspensión que se encuentran en el ambiente, así como la cantidad de humo y gases en partes por millón y la humedad relativa que se encuentra en el ambiente. La calidad del aire atmosférico es importante porque al comprimirse por medio de los compresores se introducen las impurezas dentro de los circuitos neumáticos, las cuales dañan y disminuyen la vida útil de los componentes neumáticos.

En la medida de lo posible, debe procurarse que la red de aire comprimido no tenga fugas. El aire que se fuga inútilmente constituye un despilfarro de energía. Además, ese aire desperdiciado tiene que generarse y prepararse primero, por lo que las fugas pueden tener como consecuencia la necesidad de disponer de compresores y de otros componentes innecesariamente grandes.

En términos técnicos, la estanquidad corresponde a una fuga admisible de 10–10 milibares por litro y segundo. Sin embargo, en la práctica no es necesario llegar a tal grado. Es suficiente si las fugas no superan valores entre 10–2 y 10–5 milibares por litro/s. En una red con una presión de 7 bar en el punto de toma de aire comprimido, se considera aceptable una pérdida de presión de 0,6 bar (Hesse, 2002).

El condensado que se produce en el circuito del aire comprimido es el agente más perjudicial de los componentes neumáticos y a través del desarrollo de la neumática siempre ha sido objeto de estudio con tal de disminuirlo al

máximo creándose normas internacionales. El efecto de condensación que se produce con el enfriamiento se conoce desde épocas ancestrales, tal como lo demuestran los pozos de aire (Crosser 1989).

La implementación del tratamiento del aire comprimido ha sido sometida a diferentes estudios y es necesaria para optimizar los recursos de las plantas de producción que contienen circuitos neumáticos.

La preparación del aire comprimido consiste en conseguir que el aire comprimido tenga la calidad que exige la unidad consumidora (Feldman, 1985).

Las tablas de la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas han sido creadas por los fabricantes como Festo que es líder en la investigación. Los valores de la vida útil determinada por Festo han sido obtenidos basados en las normas DIN ISO 8573-1 (Rothe, 2000).

La implementación de rutinas de mantenimiento correctivo no son eficientes con los recursos como lo son el tiempo y el económico, por lo que conociendo la vida útil de los componentes neumáticos ha sido posible la implementación de mantenimiento preventivo, lo que ha beneficiado a las plantas de producción a nivel mundial.

El mantenimiento preventivo es un conjunto de técnicas que tiene como finalidad disminuir y/o evitar las reparaciones de los ítems con tal de asegurar su total disponibilidad y rendimiento al menor coste posible. Para llevar a cabo esta práctica se requiere rutinas de inspección y renovación de los elementos malogrados y deteriorados (Gómez, 1998).

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Planteamiento del problema

Las condiciones atmosféricas del departamento de Escuintla, lugar en el cual se encuentra instalada la planta de concentrado para animales, tienen como característica que el aire que se comprime por medio de un compresor para alimentar circuitos neumáticos posea un exceso de humedad y por consiguiente contenga condensado.

Lo anterior produce que la vida útil de los cilindros y las válvulas neumáticas se reduzca en comparación con lo que detallan los fabricantes, porque el condensado produce corrosión en las partes metálicas y desgaste en los sellos. Por ello se debe implementar una adecuada preparación del aire comprimido, para evitar el condensado y la contaminación en los circuitos neumáticos en toda la planta de fabricación de concentrados de animales.

La necesidad de ahorro en las plantas de producción obligan a que se implementen mantenimientos preventivos o predictivos, al no poder determinar la vida útil se tiene el problema que no se pueden programar los mantenimientos, por lo que se implementa el mantenimiento correctivo, que es el mantenimiento en el cual se invierte más recursos.

2.2. Formulación del problema

Preguntas de la investigación

- ¿Cuál es la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas que operan en la fábrica de concentrados de animales, ubicada en Escuintla?
- ¿Cuáles son los costos provocados por las fugas de aire, por paros de producción y por fallas inesperadas de los equipos neumáticos?
- ¿Cuál es el procedimiento adecuado para el tratamiento del aire comprimido en la fábrica de concentrados para animales que se encuentra ubicada en el departamento de Escuintla?
- ¿Cuál es la forma y método adecuado de gestionar los inventarios de repuestos neumáticos en la fábrica de concentrados ubicada en el departamento de Escuintla?
- ¿Cuál es el aumento de la eficiencia energética por unidad volumétrica de aire, de las plantas de producción debido a la corrección de fugas de aire en los circuitos neumáticos?
- ¿Cuál es el aumento de la productividad que se obtiene al implementar el presente proyecto, el cual minimiza los paros de producción, en una planta de concentrados de animales ubicada en Escuintla?

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se realiza por el desconocimiento de los usuarios de los cilindros y válvulas neumáticas que operan en el departamento de Escuintla, con la empresa Areca y con la asesoría de la empresa Acisa, acerca de la vida útil real de los componentes neumáticos, lo cual constituye un parámetro de ingeniería utilizado en el diseño de programas de mantenimientos preventivos y predictivos.

Pertenece a la línea de investigación “implementación de sistemas de producción” enfocada sobre la planeación de requerimientos de materiales y de recursos productivos. El requerimiento de materiales está determinado por la vida útil de los elementos neumáticos, para programar la manera adecuada de realizar las compras para tener el inventario adecuado que elimine los paros de producción ocasionados por la falla de los elementos neumáticos.

La optimización de los recursos productivos se da cuando se usa eficientemente el aire comprimido, evitando los desperdicios provocados por las fugas y el sobredimensionamiento, disminuyendo del uso de energía eléctrica en el compresor, lo que representa un aumento de la productividad.

La fábrica de concentrados ubicada en el departamento de Escuintla usa una gran cantidad de componentes neumáticos que se utilizan para la producción de movimientos a gran velocidad y bajas presiones, por lo que se tiene un movimiento fácil de controlar y seguro tanto para los operarios como para el medio ambiente. Además el aire comprimido tiene la característica de ser limpio y reutilizable, por lo que cada vez surgen y se implementan nuevas

aplicaciones en la industria provocando un crecimiento en la instalación y utilización de los componentes neumáticos.

Por consiguiente el manejo de los componentes neumáticos y su correcta utilización tienden a mejorar la producción de los diferentes procesos al aumentar la velocidad de las máquinas y, por consiguiente, el número de piezas producidas, incrementando la productividad y generando mayores ganancias. La mayoría de los productos que se elaboran con máquinas de alta velocidad están sujetos a producción a escala, lo que tiene como consecuencia que los productos sean de bajo costo para el consumidor.

La relación entre la cantidad de aire comprimido producido (litros/min) por la cantidad de recursos utilizados para hacerlo (energía eléctrica), dará como resultado la productividad del aire comprimido. Al implementar las medidas que optimizan la vida útil de los elementos neumáticos se estará midiendo la productividad por medio de factores como la productividad observada, su estándar y el índice de la misma.

La medición y la evaluación de la productividad será el parámetro con el que se determinará el aumento de la eficiencia, rentabilidad y utilidad de las plantas de producción que optimicen la vida útil de los elementos neumáticos, el manejo de inventario de los repuestos neumáticos, la programación de rutinas de mantenimiento preventivo y el uso eficiente del aire comprimido.

4. OBJETIVOS

General

Determinar la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas que operan en el departamento de Escuintla por medio de un análisis estadístico, para aumentar la eficiencia y evitar paros de producción.

Específicos

1. Describir las características del aire atmosférico del departamento de Escuintla que provocan corrosión y abrasión en los cilindros y válvulas neumáticas, con el fin de determinar el tratamiento adecuado del aire de la región.
2. Establecer los costos de mantenimiento correctivo, fallas y paros de producción provocados por el fallo inesperado de los cilindros y válvulas neumáticas.
3. Diseñar una adecuada gestión de costos de mantenimiento para optimizar el uso de los elementos neumáticos.
4. Implementar una gestión adecuada de inventarios de repuestos que garantice la eficiencia en la producción al menor costo.

5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El estudio de la calidad del aire comprimido es importante, porque proporciona una base teórica y experimental de lo que se puede esperar en los circuitos neumáticos, como la forma en que los agentes nocivos del aire pueden influir en el fallo de los elementos neumáticos y por lo tanto en la eficiencia de los recursos de las plantas de producción.

Una de las finalidades es implementar un sistema adecuado del tratamiento del aire, utilizando equipos de medición que proporcionarán los datos para que sean analizados y así poder desarrollar un modelo matemático del comportamiento de la vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas.

El objetivo de determinar la vida útil de los componentes neumáticos que operan en el departamento de Escuintla, es implementar rutinas de mantenimiento preventivo con el fin de evitar los paros de la producción y así aumentar la productividad de las empresas.

Se sabe que el alto grado de condensado y contaminantes en el aire del departamento de Escuintla provocan que la vida útil de los componentes se más corta y difícil de pronosticar, lo que produce un exceso en el uso de mantenimiento correctivo y, por ende, un aumento en los costos de operación y operación.

6. ALCANCES

Los alcances están enfocados específicamente a nivel nacional en la región de Escuintla y en plantas de producción de concentrado de animales en las cuales existe gran cantidad de partículas sólidas corrosivas, humedad relativa y aire atmosférico contaminado.

Por la ubicación de los hechos en el tiempo, la investigación será retrospectiva porque registra información acerca de la frecuencia de cambio de cilindros y válvulas neumáticas ocurridas con anterioridad, además del registro de la información continua según los hechos.

Se estudian variables como la calidad del aire, humedad relativa, el tratamiento del aire comprimido a lo largo de un período que varía conforme se realiza una investigación longitudinal.

Por la profundidad del estudio de las variables y el alcance de los resultados, se realizará con un diseño descriptivo de enfoque cuantitativo, por lo que la recolección de la información se realiza en un determinado momento, conforme se hacen las mediciones de la calidad del aire y el análisis de la vida útil de acuerdo a los modelos matemáticos dispuestos y el análisis estadístico que se utilizará para calcular los costos que conllevan los paros de producción, así como los del aire comprimido que no es aprovechado por las fugas.

La investigación es analítica explicativa porque se estudiará la causa o factor de riesgo que resulta al utilizar los equipos neumáticos con aire comprimido que no está tratado adecuadamente y que no cumple con las normas de calidad del aire comprimido DIN ISO 8573-1, durante el primer semestre del 2014.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El aire comprimido es, junto con la corriente eléctrica, la fuente de energía más importante en plantas industriales, talleres y en otros sectores. Aunque en la Edad Antigua ya se sabía que el aire permite transportar energía, las primeras máquinas neumáticas útiles aparecieron sólo en el siglo XIX. Hace unos cien años se publicaron libros sobre: *La utilización de aire comprimido en los talleres americanos* (1904) y sobre: *El sistema de aire comprimido en el astillero imperial de Kiel* (1904). En esa época se construyeron numerosos tipos de martillos neumáticos, en muchos casos con émbolo percutor con sistema de control propio (Bronner, 2001).

Diversos aparatos de carrera corta conseguían ejecutar entre 10 000 y 15 000 movimientos por minuto, para cincelar y escoplear se utilizaban herramientas que ejecutaban hasta 2 000 movimientos por minuto. Pero la neumática industrial, tal como se conoce hoy, solo empezó a desarrollarse después de 1950, primero en los EE.UU. y posteriormente también en Alemania. La aceptación generalizada que disfrutaban las máquinas neumáticas se explica por varias razones:

- Posibilidad de generar aire comprimido en cualquier lugar y en cantidades ilimitadas.
- Gran eficiencia energética, fluidez y transporte sencillo de la energía.
- Posibilidad de almacenar el aire comprimido en depósitos que, además, pueden transportarse con facilidad.
- El aire comprimido es incombustible y no es inflamable; no existe peligro de explosión.

- Por su naturaleza, los componentes neumáticos están protegidos contra sobrecargas.
- Mantenimiento y cuidados simples, diseño sencillo de proyectos.
- Posibilidad de utilizar varios niveles de presión en función del margen admitido.

Esas ventajas son más que convincentes. La mayoría de las empresas industriales disponen actualmente de una red de aire comprimido para utilizar numerosas máquinas y diversos actuadores.

El actuador más difundido es el cilindro neumático, empleado para ejecutar movimientos. Sin embargo para que el aire contenga energía, primero hay que transferirle energía (Croser, 1989), para lo cual se utilizan los compresores.

Hay muchos tipos de compresores: helicoidales, de membrana, rotativos, tipo Roots, de espiral, de turbocompresión, lubricados o secos, con inyección de agua, con refrigeración de aire o agua, etc. Pero el compresor no es más que la primera estación. El uso de presión y vacío también se puede entender como un sistema de proceso continuo.

7.1. Fundamentos físicos

El aire comprimido es aire atmosférico sometido a presión, compuesto en un 78 % de nitrógeno, un 21 % de oxígeno y en un 1 % de otros gases (especialmente argón). La presión del aire atmosférico depende de la altura geográfica. Las magnitudes de referencia para la presión y la temperatura del aire suelen ser las siguientes:

(1) $p_0 = 1\ 013\ \text{bar}$ y $t_0 = 20\ ^\circ\text{C}$

(2) $p_0 = 1\ 013\ \text{bar}$ y $t_0 = 0\ ^\circ\text{C}$

El movimiento de los líquidos y de los gases se llama flujo. Estos dos fluidos se diferencian entre sí en la medida en que los líquidos casi no se pueden comprimir, mientras que el volumen de los gases depende en buena parte de la presión. No obstante, los cambios de volumen tienen poca importancia si los gases fluyen a una velocidad inferior que la velocidad del sonido de 340 m/s. Hasta esa velocidad se puede afirmar que el aire tiene un volumen constante.

Además, el aire se comporta casi como un gas ideal a temperaturas entre 0 °C y 200 °C y con presiones de hasta 30 bar (sin considerar la fricción interna). Partiendo de estas consideraciones, se pueden aplicar diversas ecuaciones básicas relacionadas con la mecánica de los fluidos. La presión (p), la temperatura (t) y el volumen específico (V_{esp}) son magnitudes que están proporcionalmente relacionadas entre sí. Por lo tanto, tiene validez la siguiente ecuación general:

(3)
$$\frac{p \cdot V_{\text{esp}}}{T} = \text{const.}$$

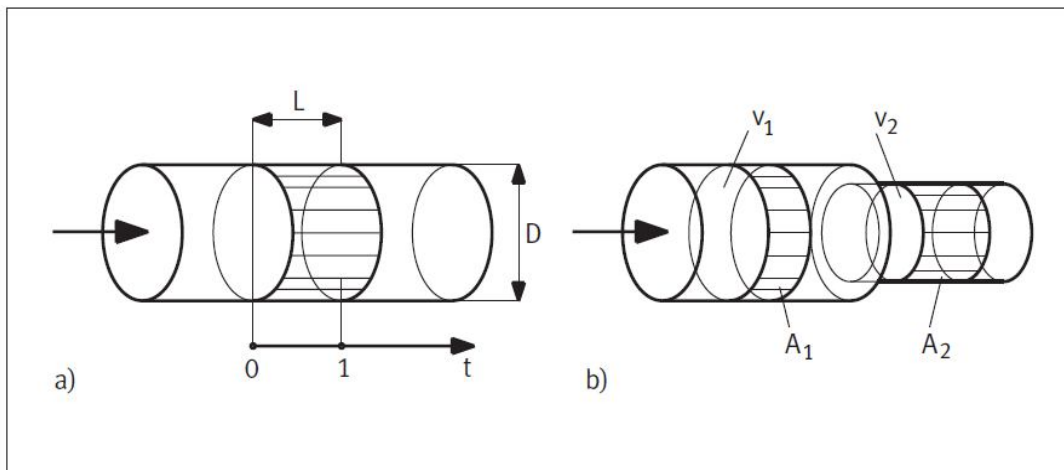
Cuando fluye aire comprimido a través de un tubo, el caudal se expresa en unidades de volumen divididas por unidades de tiempo. Considerando las condiciones de la figura 1.

(4)
$$\dot{V} = A \cdot L \quad \text{en m}^3/\text{s}$$

(5) $A = \text{Diámetro interior del tubo en m}^2; A = (D^2 \cdot \pi)/4.$

L= longitud del segmento de volumen que fluye en un segundo, expresado en metros/segundo.

Figura 1. Continuidad de los fluidos



Fuente: (Bronner, 2001).

Suponiendo que el aire se encuentra en un circuito, también tiene que pasar por la sección de menor diámetro del tubo. En ese caso se aplica la ecuación de continuidad:

(6) $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \dot{V}$

Donde V = velocidad

Expresado en otros términos, significa que las velocidades del caudal son inversamente proporcionales a los diámetros, siempre y cuando no varíe la

cantidad del caudal. En los sistemas neumáticos, el caudal del aire representa el consumo de los actuadores o de los equipos conectados a la red neumática. El caudal se suele expresar en litros por unidad de tiempo. Los factores que se aplican al hacer las conversiones deben quedar registrados. El caudal se indica generalmente en litros por minuto o en metros cúbicos por unidad de tiempo.

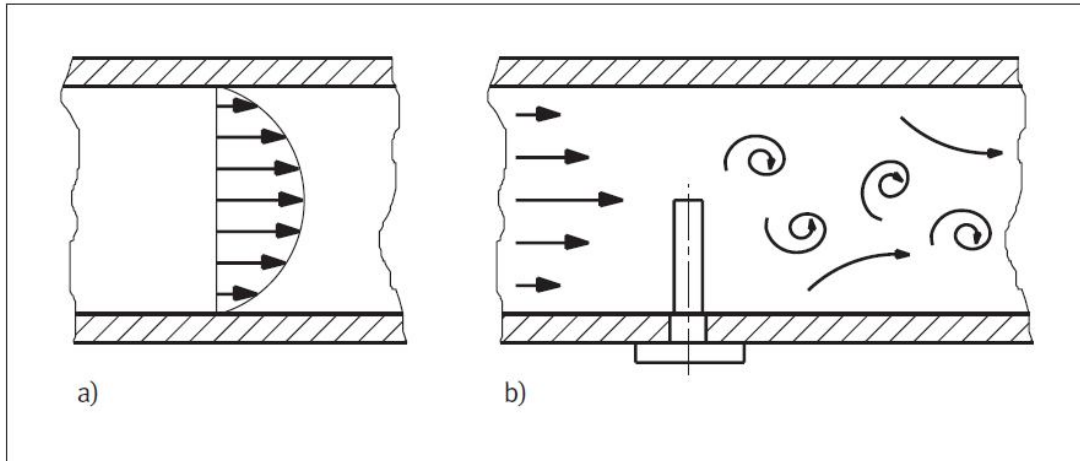
El caudal es una referencia para el rendimiento o, para ser más precisos, para el rendimiento necesario. Deberán diferenciarse los siguientes caudales:

- El caudal de un compresor, medido en el lado de aspiración o en el lado de presión.
- El caudal de la unidad consumidora, expresada en términos absolutos en función de la demanda o considerando los factores de equilibrio.

El flujo del aire es laminar si los tubos no tienen elementos perturbadores, aunque el flujo es ligeramente menor junto a la pared interior del tubo que en el centro (figura 2). Cualquier desviación o derivación del tubo, la presencia de válvulas, accesorios o instrumentos de medición provocan remolinos.

El índice de Reynolds (O. Reynolds; 1842-1912) indica el límite entre caudal laminar y caudal turbulento. Este índice expresa la influencia que tienen las fuerzas de fricción ocasionadas por los elementos perturbadores del flujo (Feldman, 1985).

Figura 2. Flujo laminar y flujo turbulento



Fuente: (Hesse, 2002).

El tipo de flujo se define en función del índice de Reynolds Re . Si Re es mayor a 2 320, entonces el flujo es laminar. Si el índice Re es mayor a 2 320 e inferior a 3 000, el flujo puede ser laminar o turbulento. Si Re es mayor a 3 000, el flujo es turbulento (arremolinado). Tratándose de redes neumáticas, la velocidad media del flujo oscila entre 6 y 40 metros/segundo, con lo que por lo general es turbulento.

Las turbulencias oponen una resistencia al flujo, produciéndose una pérdida de presión en la red, las cuales son proporcionales al cuadrado de la velocidad del flujo. Ello significa que la meta consiste en disponer de tubos con paredes interiores lo más lisas posible y en configurar la red de tal modo que oponga la mínima resistencia posible al flujo. Para calcular la velocidad media del flujo, debe aplicarse la fórmula siguiente:

$$(6) \quad v_m = \frac{\dot{m}}{A} \cdot v_{\text{esp}} \text{ (m/s)}$$

En donde:

A = sección del tubo (m^2)

v_{esp} = volumen específico (m^3/kg).

7.2. La presión y sus unidades

Bajo presión se entiende la parte de una fuerza F que se aplica sobre una superficie determinada (A). En consecuencia, el cociente de la presión es el siguiente:

$$(7) \quad p = \frac{F}{A}$$

Considerando la libre movilidad térmica de sus moléculas, los gases tienen la propiedad de llenar cualquier espacio cerrado en el que se encuentran, el cual puede ser un depósito. Las partículas oscilantes del gas chocan con la pared interior del depósito, con lo que aplican brevemente una fuerza en dicha pared. La suma de estas fuerzas redonda en la aplicación de una fuerza constante que se expresa como presión aplicada siendo constante la temperatura, dicha fuerza es proporcional a la cantidad de moléculas contenidas en el depósito. Puede diferenciarse entre diversos márgenes de presión:

- Presión atmosférica (presión barométrica del aire).
- Presión absoluta (presión comparada con vacío absoluto en calidad de valor cero).

- Presión diferencial (presión que expresa la diferencia existente entre dos presiones absolutas).
- Sobrepresión (presión que es superior a la presión atmosférica, considerando que ésta representa el valor cero).
- Vacío (presión que es inferior a la presión atmosférica, considerando que ésta representa el valor cero).
- Presión de flujo (presión en la unidad consumidora en el momento de la toma de aire comprimido).
- Presión dinámica (presión existente en una red de tuberías mientras no se consume aire comprimido).

Al aprobarse el sistema internacional de unidades (sistema SI) en 1978, el Pascal (Pa) se aceptó como unidad oficial de la presión, siendo

$$(8) \quad 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/ms}^2$$

$$(9) \quad 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$$

7.3. Calidad del aire comprimido

La contaminación se adquiere en el mismo momento en que se genera el aire comprimido, por esta razón se analizará brevemente su generación.

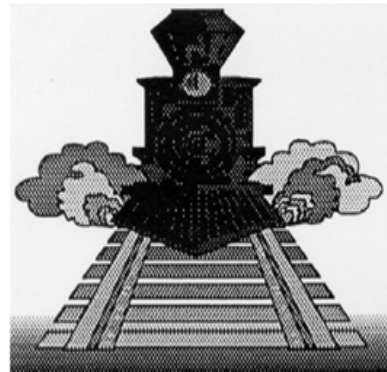
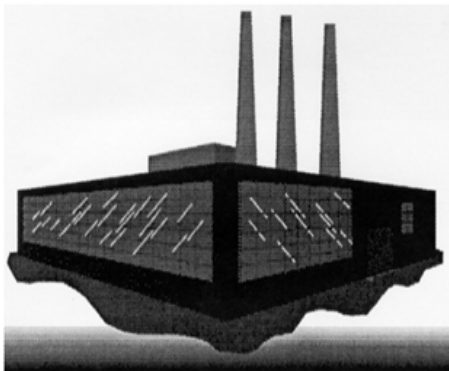
El aire atmosférico es un gas incoloro, inodoro e insípido. Está constituido por una mezcla de gases, principalmente nitrógeno y oxígeno, entre otros. Algunos de los principales contaminantes se encuentran de forma natural suspendidos en el aire, son: vapor de agua y partículas sólidas (polvo, arena, hollín y cristales de diferentes sales) (Hoffman 1987).

En las grandes ciudades, el número de estas partículas por metro cúbico, puede alcanzar la cifra de 500 000 partes/m³. Siendo el aire una mezcla, sus componentes pueden separarse, Por ejemplo si el aire es enfriado, sus diferentes componentes se separan por destilación fraccional.

Los contaminantes que se encuentran en el aire, como se pueden observar en la figura 3 y que generan trastornos en los circuitos neumáticos son los siguientes:

- 140 millones de partículas sucias existen en cada m³
- 17 gramos de agua por m³
- Agentes abrasivos (aceites usados en la compresión del aire)
- Óxido que se produce y desprende de la red de aire comprimido

Figura 3. **Contaminantes del aire**



Fuente: (Hesse, 2002).

7.3.1. Parámetros de la calidad del aire comprimido

La calidad del aire comprimido en el punto de consumo, viene definida por tres parámetros:

- Pureza, referida a la humedad y a la suciedad por partículas sólidas contenidas en el aire.
- Presión, referida al valor adecuado y constante.
- Lubricación, de acuerdo al área de aplicación.

La pureza del aire comprimido está influenciada por:

- La calidad del aire de aspiración.
- Filtro de aspiración.
- tipo de compresor utilizado.
- Mantenimiento del compresor.
- Separador de partículas sólidas contenidas.
- Refrigerador posterior.
- Sistemas de distribución de aire (tubería, disposición, etc.) (Vogel, 2001).

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

Los filtros de aspiración eliminan de un 96 a un 99 % del polvo y suciedad que contiene el aire, pero solo eliminan un 25 % del número total de partículas suspendidas. Pero cuando estos filtros de aspiración se encuentran en condiciones precarias de mantenimiento, los porcentajes disminuyen.

Los filtros de aspiración de los compresores convencionales, no detienen partículas pequeñas, aerosoles, vapores ni gases. Por otra parte, el proceso de compresión incrementa la concentración de contaminantes.

7.3.2. Partículas sólidas

Prácticamente todos los compresores, algunos más que otros, añaden partículas de desgaste y aceite de su propio cuerpo al flujo de aire, esto por su propio funcionamiento y diseño.

Las partículas sólidas en los sistemas de aire comprimido, varían en naturaleza desde partículas de polvo y de humos, hasta partículas de herrumbre, de polvo de metal, etc. Tales contaminantes, con el paso del tiempo, pueden bloquear orificios de herramientas e instrumentos debido a su tamaño (Prede, 1998).

Las partículas sólidas más pequeñas visibles son de 45 micrones y los filtros recomendados para la filtración adecuada del aire tienen que ser colocados en cascada, desde el valor mayor hasta el valor más pequeño para evitar que los tamices finos se tapen con mayor rapidez. Siguiendo el orden de 40 micrones, 5 micrones, 1 micrón, 0,1 micrones y finalizando con filtro de carbón activo para eliminar los olores que arrastra el aire comprimido. Este orden permite optimizar la vida útil de los tamices de los filtros.

El aire comprimido tiene una amplia gama de aplicaciones industriales, cuyos requerimientos de calidad de aire varía de unas a otras. Por ejemplo, los sistemas de instrumentación y control, necesitan aire relativamente a baja presión, excepto de agua, aceite y partículas extrañas. Los elementos de

trabajo en cambio, requieren aire a más alta presión, limpio, con escasa humedad y que contenga un lubricante (Mark, 1997).

Si una máquina neumática, tiene que proporcionar un rendimiento óptimo con una vida de trabajo máxima, es evidente que el aire comprimido ha de prepararse adecuadamente. Los parámetros que se cuidan en la generación del aire son:

- Presión
- Grado de secado
- Pureza
- Contenido de lubricante

7.3.3. La humedad en el aire comprimido

El aire húmedo es una mezcla entre aire seco y vapor de agua. El aire sólo puede contener vapor de agua en cantidades limitadas (Festo, 2005).

La cantidad depende de lo que indique el barómetro y, de la temperatura. Si el aire se enfría (por ejemplo, entrando en contacto con un cristal frío), el vapor de agua se deposita en el cristal en forma de pequeñas gotas. Este efecto de condensación que se produce con el enfriamiento se conoce desde épocas ancestrales, tal como lo demuestran los pozos de aire. Se trata de grandes cúpulas de piedra que con el frío de la noche extraen agua del aire húmedo. Los límites de la condensación están determinados por el punto de rocío y por el punto de condensación bajo presión.

7.3.4. Punto de rocío

El punto de rocío o, también, punto de condensación, es la temperatura en la que el aire está saturado de vapor de agua. Esta saturación completa corresponde a una humedad de 100 por ciento. En el momento en que la temperatura del aire es inferior a ese punto, empieza la condensación del aire húmedo. Si las temperaturas son inferiores a cero grados Celsius, se forma hielo (Hoffman, 1987).

Este fenómeno puede limitar considerablemente el caudal y el funcionamiento de los componentes incluidos en una red neumática. Cuanto menor es el punto de rocío, tanto menor es la cantidad de agua que puede retener el aire. El punto de rocío depende de la humedad relativa del aire, de la temperatura y de la presión, aplicándose lo siguiente:

- Cuánto más alta es la temperatura, más vapor de agua es capaz de retener el aire.
- Cuánto más alta es la presión, menos humedad contiene el aire.

7.3.5. El punto de condensación

El punto de condensación bajo presión es un criterio que se utiliza, por ejemplo, para comparar el rendimiento de diversos tipos de secadores de aire. El punto de condensación bajo presión corresponde a la temperatura que se aplica para obtener una determinada presión de funcionamiento. Si se reduce la presión del aire comprimido hasta alcanzar la presión atmosférica, el aire aumenta de volumen. Por ello, el punto de rocío del aire a presión atmosférica es inferior al punto de condensación bajo presión, suponiendo que la temperatura se mantiene constante.

Si, por ejemplo, el aire tiene un punto de condensación bajo presión de +5 °C, no puede condensar agua mientras que la temperatura ambiente sea superior a +5 °C. En el momento en que el aire comprimido tiene una temperatura inferior a esos +5 °C, se produce condensado.

7.3.6. La humedad del aire

La humedad relativa del aire W_{rel} es la relación entre el contenido real de vapor de agua y el contenido máximo posible de vapor de agua en el aire (estado de saturación) (Festo 2005).

Considérese que cualquier cambio de temperatura provoca una modificación de la humedad relativa aunque se mantenga igual la humedad absoluta del aire.

7.3.6.1. Humedad máxima del aire

La humedad máxima del aire ($f_{m\acute{a}x}$ en g/m^3), corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que contiene un metro cúbico de aire (cantidad de saturación) a una determinada temperatura.

7.3.6.2. Humedad absoluta del aire

La humedad absoluta del aire (f en g/m^3), corresponde a la cantidad de vapor de agua realmente contenida en un metro cúbico.

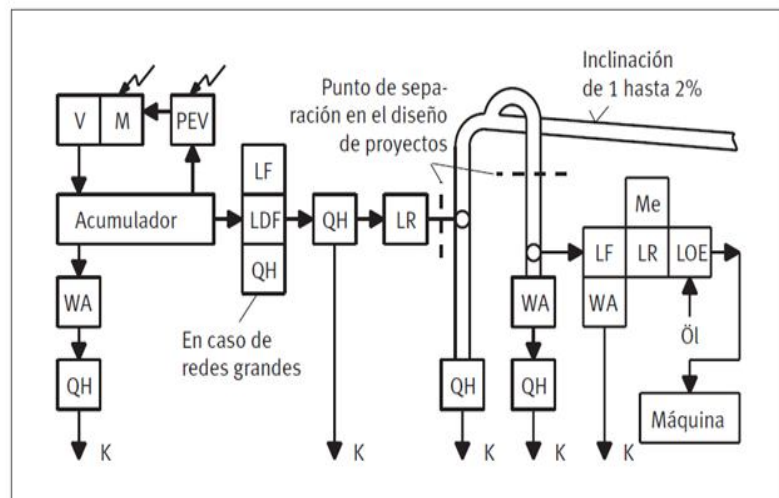
7.4 Preparación del aire comprimido

La finalidad de la preparación del aire consiste en conseguir que el aire comprimido tenga la calidad que exige la unidad consumidora. El proceso de preparación del aire puede clasificarse en tres fases: en primer lugar, la eliminación de partículas gruesas, en segundo lugar el secado y, en tercer lugar, la preparación fina del aire. Inmediatamente detrás del compresor se procede a la eliminación de las partículas gruesas. En la figura 4 se muestra un esquema simplificado de una red neumática.

Figura 4. Esquema de red neumática

Fig. 3-1
Esquema
de una red neumática

K Condensado
LF Filtro
LOE Lubricador
(aceite nebulizado)
LDF Secador
LR Válvula reductora
de presión
M Motor
Me Instrumento de medición,
manómetro
PEV Presostato
QH Válvula de cierre
V Compresor
WA Separador de agua



Fuente: (Hesse, 2002).

El aire comprimido debe prepararse lo mínimo posible, aunque siempre tanto como sea necesario. En otras palabras, el aire comprimido debe estar únicamente tan limpio como sea indispensable. Además, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- Si se necesita aire comprimido de diversas calidades, puede prepararse el aire de modo centralizado de tal manera que su calidad corresponda a la clase de calidad más alta necesaria. Sin embargo, es más económico preparar el aire de mayor calidad por separado, junto a los consumidores que lo exigen (preparación fina descentralizada).
- Si se necesita aire comprimido con diversas presiones, es más económico utilizar intensificadores de presión descentralizados, ya que así la presión puede ser inferior en el resto de la red neumática.
- El aire aspirado por el compresor debe ser lo más frío, seco y limpio posible.
- Si se aspira aire caliente y húmedo, se produce una mayor cantidad de condensado.
- Si la red de aire comprimido sufre fuertes oscilaciones de presión, es recomendable montar un pequeño depósito delante de la unidad de mantenimiento.
- En la parte más baja de la red de tuberías debería colocarse un equipo para acumular y evacuar el condensado que se va formando en la red.
- La necesidad de preparar el aire no se explica únicamente por las exigencias que plantean los procesos de fabricación, ya que también es recomendable por razones de salud. El aire de escape que contiene aceite puede dañar la salud de los operarios y, además, es dañino para el medio ambiente.

El aire tiene las siguientes propiedades físicas, según como se muestra en la tabla I.

Tabla I. **Propiedades físicas del aire**

Magnitud física	Valor cuantitativo	Unidades
Densidad ρ a 0 °C a 15 °C a 20 °C	1,293 1,223 1,199	kg/m ³ kg/m ³ kg/m ³
Constante R de los gases perfectos	287	J/kg · K
Capacidad térmica a 0 °C; $p = \text{constante}$ a 0 °C; $V = \text{constante}$	$c_p = 1,005$ $c_v = 0,716$	kJ/kg · K kJ/kg · K
Exponente adiabático	1,4	
Viscosidad dinámica (presión normalizada) a 20 °C	$18,13 \cdot 10^{-6}$	Pa · s
Viscosidad cinemática (presión normalizada) a 20 °C (= relación viscosidad/densidad)	15,55	mm ² /s

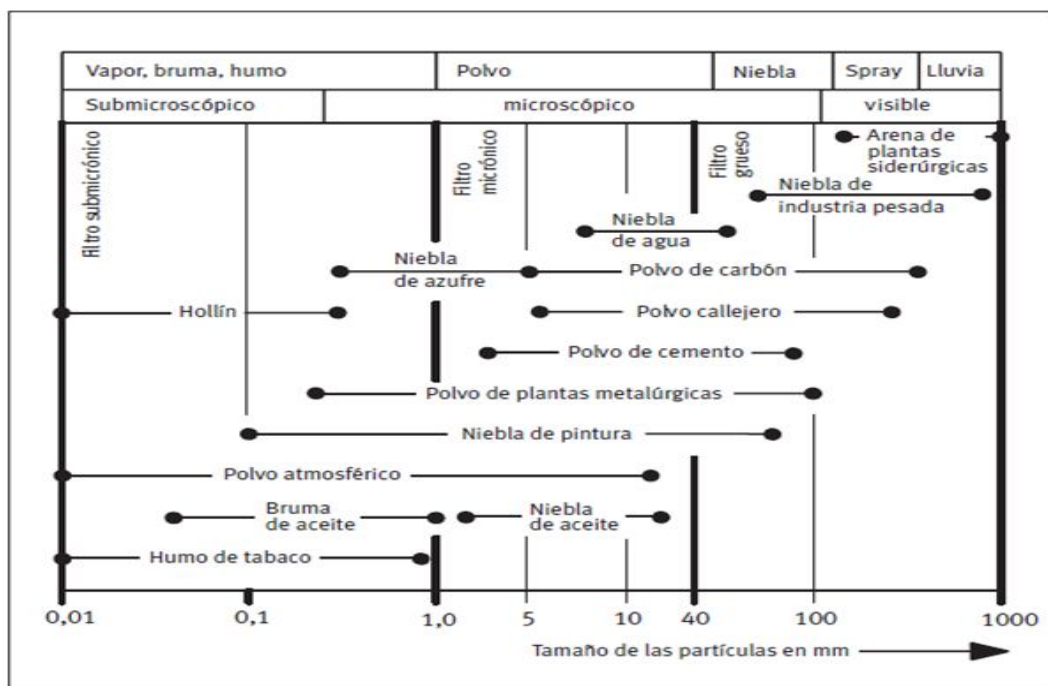
Fuente: (Festo, 2013).

Según la Norma ISO 6358, la densidad normal del aire es de 1 185 kg/m³, la compresión del aire implica determinados problemas, ya que al comprimirse el aire también se comprimen todas las impurezas que contiene, como polvo, hollín, suciedad, hidrocarburos, gérmenes y vapor de agua. A estas impurezas se suman las partículas que provienen del propio compresor, como polvo de abrasión por desgaste, aceites coquizados y aerosoles. Ello significa que al comprimir a 8 bar el aire atmosférico, aumenta la concentración de las impurezas multiplicándose por nueve.

Además, la red de tuberías también contiene residuos y depósitos, como óxido, cascarilla, residuos de soldadura y de sustancias hermetizantes que pueden producirse durante el montaje de la valvulería. En el cuadro general de la figura 6 se aprecia el tipo y tamaño de las partículas que puede contener el aire. En las grandes ciudades, el aire contiene aproximadamente 140 millones de partículas de polvo por metro cúbico. De esas partículas, el 80 por ciento

tiene un tamaño inferior a 5 micrómetros (μm). Para que el aire que respiramos pueda considerarse limpio, no debe contener partículas de tamaño superior a 0,01 micrómetros (μm).

Figura 5. Tamaño de partículas en el aire



Fuente: (Croser, 1989).

Ello significa que, en estado natural, el aire no es limpio. Las impurezas pueden ocasionar fallos en las unidades consumidoras y dañar la red neumática. Las impurezas como se muestra en la tabla II, incluso pueden tener una influencia recíproca negativa. Las partículas de polvo, por ejemplo, crean partículas más grandes si entran en contacto con agua o aceite. El aceite, por su parte, crea una emulsión si entra en contacto con agua.

Existen clases de calidad recomendadas para cada aplicación neumática. Estas clases corresponden a la calidad del aire que, como mínimo, necesita la unidad consumidora correspondiente. En la siguiente tabla consta la calidad del aire comprimido en función de los tipos de impurezas, las clases de calidad se definen en concordancia con la Norma DIN ISO 8573-1 (Feldman, 1985).

Tabla II. **Calidad del aire según sus impurezas**

Aplicaciones	Cuerpos sólidos (μm)	Punto de condensación del agua ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Contenido máx. de aceite (mg/m^3)	Clase de filtración recomendada
Minería	40	–	25	40 μm
Lavandería	40	+10	5	40 μm
Máquinas soldadoras	40	+10	25	40 μm
Máquinas herramienta	40	+3	25	40 μm
Cilindros neumáticos	40	+3	25	40 μm
Válvulas neumáticas	40 o bien 50	+3	25	40 o bien 50 μm
Máquinas de embalaje	40	+3	1	5 μm – 1 μm
Reguladores finos de presión	5	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire de medición	1	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire en almacén	1	–20	1	5 μm – 1 μm
Aire para aplicación de pintura	1	+3	0,1	5 μm – 1 μm
Técnica de detectores	1	–20 o bien –40	0,1	5 μm – 1 μm
Aire puro para respirar	0,01	–	–	–0.01 μm

Fuente: (Feldman, 1985).

En esta norma también se clasifica el aire según 7 clases de calidad. En la tabla siguiente, los datos indicados en metros cúbicos se refieren al estado normalizado según ISO 554.

Tabla III. Estado normalizado ISO 554

Clase	Tamaño máx. de las partículas en μm	Densidad máxima de las partículas en mg/m^3	Punto máx. de condensación bajo presión en $^{\circ}\text{C}$	Contenido máx. de aceite residual en mg/m^3
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1,0
4	15	8	+3	5
5	40	10	+7	25
6	-	-	+10	-
7	-	-	sin definir	-

Fuente: (ISO, 2010).

7.4.1. Procedimiento de secado

El aire, al comprimirse, se calienta, por lo que es necesario montar un equipo de refrigeración del aire inmediatamente detrás del compresor. El calentamiento se produce porque el aumento de la energía necesaria para incrementar la presión de p_1 a p_2 implica un aumento de la temperatura de T_1 a T_2 . El calentamiento se puede calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$(10) \quad T_2 = T_1 \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{(k-1)}{k}}$$

Pudiendo ser k desde 1,38 hasta 1,4.

El aire siempre contiene una cantidad mayor o menor de vapor de agua. Sin embargo, el aire solo puede contener una cantidad limitada de agua (hasta la cantidad de saturación). Antes que el aire comprimido llegue a las unidades consumidoras, debe conseguirse que se condense la mayor cantidad posible del vapor de agua. Si no se utiliza un compresor exento de aceite, se obtiene una mezcla comprimida de aire y aceite. Ese aceite tiene que extraerse del aire mediante un separador y, a continuación, refrigerarse.

Para que los elementos de mando y los elementos funcionales neumáticos no se transformen en “elementos hidráulicos”, es recomendable secar el aire comprimido.

El secado es el proceso más importante de la operación de preparación del aire. Secando bien el aire se evita la corrosión de los tubos y de los elementos neumáticos (Bronner, 2001).

El criterio que se aplica para medir el secado del aire es la temperatura del punto de condensación). Cuanta más alta es la temperatura del aire comprimido, más agua puede contener el aire (cantidad de saturación). Así lo demuestra la siguiente tabla.

Tabla IV. **Contenido de vapor de agua**

Temperatura en °C	-20	-10	0	5	10	15	20	30	50	70	90	100
Contenido máx. de vapor de agua en g/m ³	0,9	2,2	4,9	6,8	9,4	12,7	17,1	30,1	82,3	196,2	472	588

Fuente: (Prede, 1998).

7.4.2. Filtración

Desde hace más de 100 años se utilizan filtros de aire, lo que significa que han experimentado una larga evolución. Originalmente se empleaban tejidos para filtrar. La elección del filtro apropiado es fundamental para la calidad del aire. Para obtener aire comprimido de alta calidad, es necesario prever varias fases de filtración. Un solo filtro “fino” no es suficiente para obtener aire de calidad satisfactoria.

7.4.2.1. Clasificación de los filtros

- Filtro: los filtros comunes son capaces de retener partículas de tamaños superiores a 40 μm o a 5 μm , según su grado de filtración y el tipo de cartucho filtrante.
- Microfiltro: estos filtros retienen partículas de tamaños superiores a 0,1 μm .
- Filtro submicrónico: estos filtros pueden retener partículas de tamaños superiores a 0,01 μm . Sin embargo, antes de pasar por estos filtros, el aire tiene que haber pasado previamente por otro, capaz de retener partículas de hasta 5 μm .
- Filtros de carbón activo: estos filtros son capaces de retener partículas a partir de 0,003 μm , lo que significa que pueden retener sustancias aromatizantes u odoríferas. Los filtros de carbón activo también se llaman filtros submicrónicos. Para conseguir aire de clases de mayor calidad, la filtración de las sustancias sólidas siempre deberá hacerse por fases, para lo que puede montarse, por ejemplo, un filtro submicrónico detrás de un filtro micrónico.

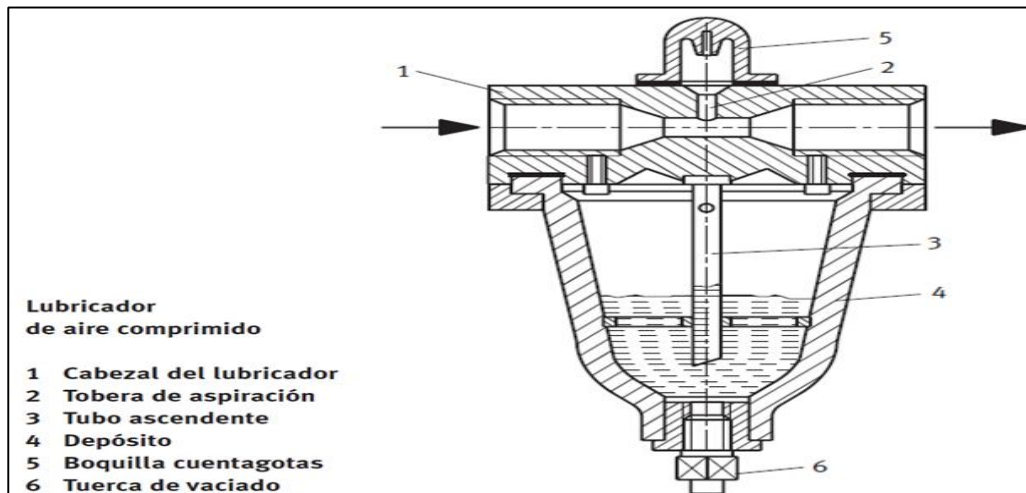
7.4.3. Lubricadores

En determinadas aplicaciones es necesario disponer de aire comprimido lubricado. Así sucede si el aire no solamente es agente energético, sino también lubricante de las partes móviles de los elementos de trabajo. Los lubricadores se encargan automáticamente de dosificar la niebla de aceite necesaria. El aire enriquecido con niebla de aceite evita que se produzca una fricción seca en las partes móviles de los actuadores y las unidades consumidoras y, además, contribuye a evitar su desgaste prematuro. Sin embargo, sería incorrecto creer que el aceite proveniente del compresor es apropiado para cumplir estas funciones.

Buena parte de la estructura molecular de este aceite se destruye por la presión y el calor durante la operación de compresión, con lo que se convierte en un medio ácido muy agresivo. Ello significa que este aceite es completamente inapropiado para la lubricación de los componentes de la red.

El cabezal del lubricador estándar tiene una tobera Venturi por la que pasa el aire comprimido. A raíz de la forma convergente de la tobera, se produce un vacío en el lado de aspiración, mediante el cual se aspira el aceite desde el depósito a través de un tubo ascendente como se puede observar en la siguiente figura. A continuación, el aceite gotea y, al hacerlo, se nebuliza. Con una válvula reguladora es posible dosificar la cantidad de gotas que deben caer en la corriente de aire comprimido.

Figura 6. **Lubricador de aire comprimido**



Fuente: (Festo, 2013).

7.4.4. Unidades de mantenimiento

Las unidades de mantenimiento son combinaciones compactas, por lo general compuestas de una válvula de cierre, filtro, válvula reguladora de presión y lubricador (montaje en ese orden) (Festo, 2005).

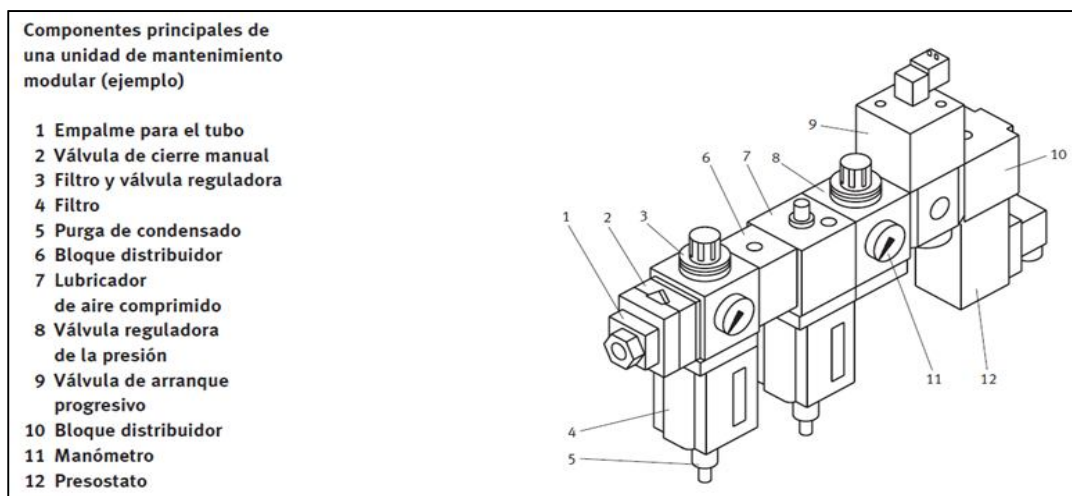
Estas unidades se montan cerca de las unidades consumidoras y tienen la finalidad de preparar el aire comprimido. Al montar los componentes de una unidad de mantenimiento deberá tenerse en cuenta la dirección del flujo, tal como consta en cada uno de ellos mediante una flecha indicadora. Además, las unidades de mantenimiento también pueden incluir componentes de seguridad y de control. Si la unidad consumidora es una máquina grande, las unidades de mantenimiento pueden estar montadas en el bastidor de la máquina. En ese

caso, el espacio libre debajo de la unidad de mantenimiento tiene que ser suficiente para montar un depósito para el condensado.

Los reguladores de presión tienen la finalidad de mantener un nivel de presión constante, incluso si varía el consumo de aire comprimido, y, además, deben garantizar la disposición de la presión de trabajo necesaria.

La presión de funcionamiento se regula mediante la válvula reguladora. En la siguiente figura se aprecia la estructura modular de una unidad de mantenimiento.

Figura 7. **Unidad de mantenimiento modular**



Fuente: (Rothe, 2000).

Las unidades de mantenimiento permiten obtener aire comprimido preparado de modo óptimo y, además, consiguen absorber las oscilaciones que puede experimentar la presión debido a la conexión y desconexión del compresor. Ello significa que tanto el lado secundario como el lado primario

están acoplados a la unidad de mantenimiento. Los módulos de distribución permiten obtener aire comprimido de diversas calidades mediante diversas combinaciones de filtros (por ejemplo, aire no lubricado que a continuación puede pasar por un lubricador). Además, también es posible componer unidades de mantenimiento para diversos niveles de presión independientes entre sí.

Para elegir la unidad de mantenimiento más apropiada, debe recurrirse siempre a los siguientes criterios: presión, caudal, humedad, contenido de aceite y cantidad y tamaño de las partículas. Adicionalmente es recomendable tener en cuenta las sugerencias que se explican a continuación:

- La unidad de mantenimiento siempre debe tener conexiones de un tamaño por una unidad superior que el tamaño que sería teóricamente suficiente para el caudal máximo previsible. Si las conexiones son demasiado pequeñas, se producen oscilaciones de presión en los reguladores y disminuye la duración de los filtros.
- Las unidades de mantenimiento deben montarse en el lugar de menor temperatura de todo el sistema, por ejemplo en el lado interior de una pared exterior de la nave de la fábrica y no en la zona cercana a una máquina que irradia calor.
- La unidad de mantenimiento debe montarse a máximo 5 metros de distancia de la última unidad consumidora. De lo contrario, es posible que la niebla de aceite se deposite antes de llegar a la unidad consumidora que la necesita (suponiendo que se trabaje con aire lubricado).

- El separador de agua se encarga de eliminar las gotas de agua acumuladas en la red de tuberías. Pero, aunque el recipiente sea grande, termina llenándose. Por ello, es absolutamente necesario efectuar los trabajos de mantenimiento con regularidad y en concordancia con las recomendaciones oficiales. Si se tienen dudas, es preferible prever desde un principio el uso de un separador automático.
- Los depósitos de los filtros deberían limpiarse únicamente con agua, no con detergentes. En caso de aplicaciones en condiciones industriales rudas, es preferible utilizar una funda protectora metálica.
- Es recomendable que los filtros para la retención de sustancias sólidas no sean más grandes que lo absolutamente necesario. Al montarlos, debe tenerse en cuenta la dirección del flujo. Los cartuchos filtrantes no se limpian y deben desecharse.
- En caso de emplear un secador por adsorción, debe utilizarse una unidad de prefiltración (grado de filtración de 1 μm) con el fin de prolongar su duración. El aceite disminuiría considerablemente la duración del agente secante. Además, la temperatura de entrada debería ser inferior a 35 °C.
- Para evitar el uso no autorizado de la válvula de regulación, esta puede estar provista de cabezales con llave.
- Únicamente deberán utilizarse los aceites minerales de poca viscosidad recomendados por el fabricante de los lubricadores de aire comprimido.

- Si se utilizan cilindros grandes (con émbolos de diámetro superior a 100 mm) que funcionan con aire comprimido lubricado, es recomendable utilizar un silenciador para el aire de escape del filtro. De esta manera disminuye el nivel de ruidos y, además, se retienen las partículas mediante un cartucho microfiltrante.
- También las unidades de mantenimiento mismas tienen que someterse a un servicio de mantenimiento regular, ya que de lo contrario pueden averiarse o funcionar de modo deficiente.

7.5. Cilindro neumático

Los cilindros neumáticos son unidades que transforman la energía potencial del aire comprimido en energía cinética (Hoffman 1987).

Básicamente consisten en un recipiente cilíndrico provisto de un émbolo o pistón. Al introducir un determinado caudal de aire comprimido, este se expande dentro de la cámara y provoca un desplazamiento lineal. Si se acopla al émbolo un vástago rígido, este mecanismo es capaz de empujar algún elemento, o simplemente sujetarlo. La fuerza de empuje es proporcional a la presión del aire y a la superficie del pistón:

$$(11) \quad F = P \cdot A$$

En donde:

F = fuerza

P = presión manométrica

A = área del émbolo o pistón

7.5.1. Consumo de aire en cilindros

El cálculo del consumo de aire en cilindros neumáticos es muy importante cuando se requiere conocer la capacidad del compresor necesario para abastecer a la demanda de una instalación. Puede calcularse con la siguiente fórmula, o mediante el ábaco adjunto:

$$(12) \quad Q = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot c \cdot n \cdot P \cdot N \cdot 10^{-6}$$

En donde:

Q = consumo de aire (NI/min)

d = diámetro del cilindro (mm)

c = carrera del cilindro (mm)

n = número de ciclos completos por minuto

P = presión absoluta=Presión relativa de trabajo + 1 bar

N = número de efectos del cilindro

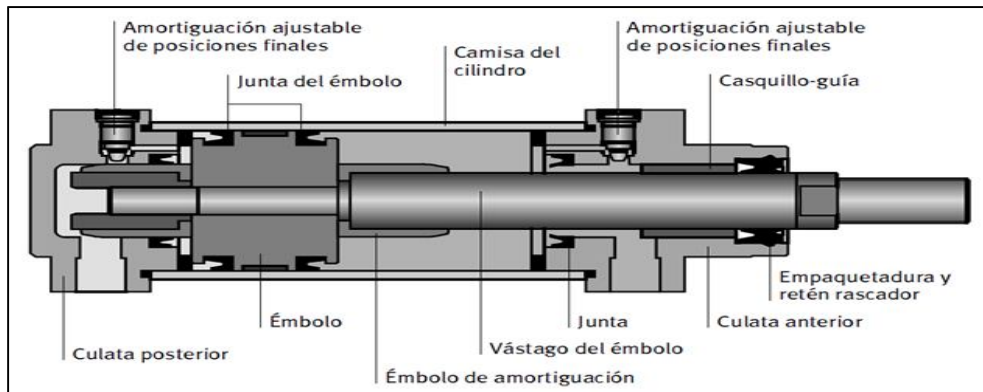
(N=1 para simple efecto, N=2 para doble efecto).

Estructura de los cilindros y tipos de juntas

- Camisa del cilindro
- Culata anterior y posterior
- Émbolo con junta
- Vástago del émbolo
- Casquillo de cojinete
- Anillo rascador
- Piezas de unión
- Juntas
- Muelle de reposición (sólo en cilindros de simple efecto)

En la siguiente figura se puede observar un cilindro neumático.

Figura 8. **Cilindro neumático**



Fuente: (Mark, 1997).

7.5.2. Criterios para el montaje

- Dimensiones, ajuste, resistencia a la fricción, vida útil, resistencia a productos químicos.
- Materiales: perbunan, viton, teflón.

7.6. Válvulas neumáticas

Los mandos neumáticos o válvulas neumáticas están constituidos por elementos de señalización, elementos de mando y un aporte de trabajo. Los elementos de señalización y mando modulan las fases de trabajo de los elementos de trabajo y se denominan válvulas. Los sistemas neumáticos e hidráulicos están constituidos por:

- Elementos de información
- Órganos de mando
- Elementos de trabajo
- Elementos artísticos

Para el tratamiento de la información de mando es preciso emplear aparatos que controlen y dirijan el fluido de forma preestablecida, lo que obliga a disponer de una serie de elementos que efectúen las funciones deseadas relativas al control y dirección del flujo del aire comprimido (Rothe, 2000).

En los principios de la automatización, los elementos rediseñados se mandan manual o mecánicamente. Cuando por necesidades de trabajo se precisaba efectuar el mando a distancia, se utilizan elementos de comando por símbolo neumático (cuervo).

Actualmente, además de los mandos manuales para la actuación de estos elementos, se emplean para el comando procedimientos servoneumáticos, electroneumáticos y automáticos que efectúan en su totalidad el tratamiento de la información y de la amplificación de señales.

La gran evolución de la neumática y la hidráulica han hecho, a su vez, evolucionar los procesos para el tratamiento y amplificación de señales, y por tanto, hoy en día se dispone de una gama muy extensa de válvulas y distribuidores que nos permiten elegir el sistema que mejor se adapte a las necesidades.

Hay veces que el comando se realiza manualmente, y otras nos obliga a recurrir a la electricidad (para automatizar) por razones diversas, sobre todo cuando las distancias son importantes y no existen circunstancias adversas.

Las válvulas en términos generales, tienen las siguientes misiones:

- Distribuir el fluido
- Regular caudal
- Regular presión

Las válvulas son elementos que mandan o regulan la puesta en marcha, el paro y la dirección, así como la presión o el caudal del fluido enviado por el compresor o almacenado en un depósito. Esta es la definición de la norma DIN/ISO 1219 conforme a una recomendación del CETOP (Comité Européen des Transmissions Oléohydrauliques et Pneumatiques) (Festo 2005).

Según su función las válvulas se subdividen en 5 grupos:

- Válvulas de vías o distribuidoras
- Válvulas de bloqueo
- Válvulas de presión
- Válvulas de caudal
- Válvulas de cierre.

7.7. Vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas

Las características de la vida útil están determinadas estadísticamente por ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio. El promedio de la vida útil aplica para todas las familias, pero los resultados pueden variar levemente.

Los resultados de la vida útil de estos dispositivos han sido obtenidos en pruebas de laboratorio que cumplen con las siguientes normas:

- Norma DIN-ISO 8573-1 Clase 4
- Filtración del aire: DIN-ISO 8573-1 Clase 5
- Aire sin lubricar DIN-ISO 8573-1 Clase 1
- Aire Lubricado DIN-ISO 8573-1 Clase 5 (Festo, 2010)

A continuación la tabla detalla la vida útil de las familias de válvulas neumáticas Festo, dada en millones de conmutaciones o activaciones;

Tabla V. Vida útil de las válvulas Festo

			20 - 50	50 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000
Terminal valves	Type 03	Midi		x			
		Maxi	x				
	Type 04 ISO-5599/2	Size 1			x		
		Size 2	x				
		Size 3	x				
	Type 14 VDMA (15407-1)	Size 02			x		
		Size 01			x		
	Type 10	CPV10				x	
		CPV14				x	
		CPV18			x		
	Type 12	CRA10			x		
		CRA14			x		
	Type 15	CDVI			x		
	Type 24	VTVB			x		
	Type 32	MFA1				x	
		MFA2			x		
	Type 44 ISO-Plug In (15407-2)	Size 02			x		
		Size 01			X		
	Type 80	CPVSC1			x		
	Type 82	CPASC1				x	
Individual valves	VUVB	Size QS4/6/8/10		x			
	Tiger Classic	Size 1/8 and 1/4		x			
		Size 1/2 and 3/4	x				
	Tiger 2000	Size 1/8, 1/4 and 3/8	x				
	Midi ISO valve 5599/1	Size 1/8			x		
		Size 1			x		
		Size 2	x				
	ISO (VSVA) valve 15407-1	Size 3	x				
		Size 02			x		
		Size 01			x		
		CPE10				x	
	CPE	CPE14				x	
		CPE18			x		
		CPE24			x		
		Miniature valve	MH1				x
	Fast-switching valve	MH2, MH3, MH4					x
Prop. valves	MPPE	Size 1/8, 1/4 and 1/2		x			
		Size 1/8, 1/4 and 1/2		x			
	VPPE	Size 1/8		x			
	MPYE	Size M5, 1/8, 1/4, 3/8				x	
Shut/off, pressure and flow control valves	GRLA	GRLA-QS		x			
		GRLA-M5	x				
HGL	Size M5... 1/2	x					

Fuente: (Festo, 2010).

La tabla VI describe la vida útil de los cilindros neumáticos en kilómetros recorridos.

Tabla VI. **Vida útil de los cilindros Festo en km**

Cylinder type	< 5.000 km	5 - 10.000 km	≥ 10.000 km
DSNU (stroke > 100 mm)			x
ESN, DSN	x		
ESN, DSN (stroke >100 mm)	x		
DNC			x
DNCB			x
DZH		x	
DGC			x
DGP/DGPL		x	
DGO		x	
SLG		x	
SLE, SLM		x	
DFM		x	
FEN/FENG			x
DGEA			x
DGE-ZR			x
DGE-ZR-RF			x
DGE-SP	x		

Fuente: (Festo, 2010).

En siguiente tabla se muestra la vida útil dada en millones de ciclos de los cilindros neumáticos Festo.

Tabla VII. Vida útil de los cilindros Festo en ciclos

Cylinder type	< 5	5 - 15	15 - 25	≥ 25
DSNU (stroke < 100 mm)				x
ESNU				x
DSN, ESN (stroke < 100 mm)		x		
ADN, AEN				x
ADVU				x
AEVU		x		
ADV				x
EZH			x	
DSEU, ESEU	x			
EG, DG		x		
DFK		x		
EGZ				x
DGS				x
DSL			x	
DSM				x
DRQD				x
EV		x		
DNCKE	x			
DNC-KP	x			
DSNU-KP	x			
SLT				x
SLF		x		
SLS			x	
DPZ			x	
DPZC			x	
HMP-B, HMPL			x	
HSP		x		
HGP, HGR, HGD, HGW			x	
HGPT, HGPL			x	
HGPP				x
HGDS		x		
YSR, YSRW, YSRD			x	

Fuente: (Festo, 2010).

7.8. Mantenimiento

El mantenimiento está definido por la EFNMS (Federación Europea de Asociaciones Nacionales de Mantenimiento) como: “El conjunto de actividades técnicas y administrativas cuya finalidad es conservar o restituir un sistema, subsistema, instalación, planta, máquina, equipo, estructura, edificio, conjunto, componente o pieza en o a la condición que la permita desarrollar su función” (Gómez 1998).

A continuación se presentan los tres tipos básicos de mantenimiento, cada uno tiene distintas aplicaciones en función del tipo de planta. Para aplicaciones más concretas del mantenimiento puede acceder a la línea de mantenimiento y eficiencia.

Existen tres tipos básicos de mantenimiento el correctivo, el preventivo y el predictivo que se basan en tareas distintas. Cada tipo de mantenimiento será ideal en un tipo de situación y equipo en función de distintos factores como el económico, el personal disponible, el tiempo de trabajo, la cantidad de repuestos, etc.

De cualquier manera un buen programa de mantenimiento debe ser capaz de conjugar los tres tipos de la mejor manera posible para permitir alargar la vida útil de los componentes que conforman la planta de manera económica y eficiente (Higgins, 2002).

7.8.1. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es aquel en que solo se interviene en el equipo después de su fallo. Este tipo de mantenimiento, aplicado en muchas situaciones, tiene como principal ventaja la reducción de costos de inspecciones y reparaciones (Sánchez 2007).

Es evidente que solo se aplicará en aquellas situaciones en que los elementos sean de bajo costo y baja criticidad de funcionamiento. Este mantenimiento por tanto resulta ideal en casos en que la restitución o reparación no afecte en gran medida a la producción o explotación llevada a cabo por la compañía o cuando la puesta en práctica de un sistema más complejo resulte menos rentable que una práctica correctiva.

El mantenimiento correctivo, sin embargo, no debe estar exento de tareas rutinarias de engrase, lubricación y/o sustitución de componentes que permitan alargar la vida útil del ítem, a menos que se trate de una instalación o componente en las fases finales de su vida útil.

Los principales inconvenientes están relacionados con la imprevisibilidad de las averías y fallos que resultan inoportunos. Debido a que las tareas no están programadas, se supone que cuando se produzca el fallo se tarde más y se necesite más mano de obra para corregirlo, que en caso de tener un programa de mantenimiento que planee esta situación.

Otro grave inconveniente que presenta este tipo de mantenimiento, es que el problema que ha causado el fallo no se resuelve, por lo que este puede repetirse en situaciones posteriores en la misma máquina sin aumentar su fiabilidad, es por ello que el mantenimiento correctivo normalmente viene acompañado de un acortamiento de periodos de reparación en la misma máquina.

7.8.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es un conjunto de técnicas que tiene como finalidad disminuir y/o evitar las reparaciones de los ítems con tal de asegurar su total disponibilidad y rendimiento al menor costo posible. Para llevar a cabo esta práctica se requiere rutinas de inspección y renovación de los elementos malogrados y deteriorados (Sánchez, 2007).

Las inspecciones son los procesos por el cual se procede al desmontaje total o parcial del equipo a fin de revisar el estado de sus elementos. Durante la inspección se reemplazan aquellos elementos que no cumplan con los

requisitos de funcionamiento de la máquina. Los elementos también pueden ser sustituidos tomando como referencia su vida útil o su tiempo de operación con tal de reducir su riesgo de fallo.

Los períodos de inspección son cruciales para que el mantenimiento preventivo tenga éxito, ya que un período demasiado corto conllevará costos innecesarios mientras que un periodo demasiado largo conlleva a un aumento del riesgo de fallo.

El principal inconveniente del mantenimiento preventivo es el costo de las inspecciones. En algunos casos el paro en la máquina puede comportar grandes pérdidas y realizar un desmontaje e inspección de un equipo que funciona correctamente puede resultar superfluo. De todas maneras el riesgo de fallo siempre existe pese a que un período de inspección corto ayuda a reducirlo.

El mantenimiento preventivo también está comprendido por el llamado mantenimiento rutinario, conjunto de técnicas que sin llegar al desmontaje de los equipos los conserva en el mejor estado posible por medio de engrases, limpiezas, sustituciones periódicas, etc.

El mantenimiento preventivo se aplicará en aquellos casos en que este sea económicamente rentable frente a un programa de reparaciones de tipo correctivo.

En algunas situaciones es posible que se dé la situación contraria, pero es frecuente que una avería en algún componente comporte deterioros y fallos en otros elementos de la maquinaria empleada. Los programas de mantenimiento preventivo requieren también que exista una prioridad en función de la vida

esperada de algunos componentes y de su importancia para el funcionamiento del conjunto. De igual manera los elementos más utilizados pueden ser almacenados para ser restituidos en caso de fallo de manera sistemática.

7.8.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es el conjunto de técnicas que permiten; reduciendo los costos del programa de mantenimiento tradicional, preventivo y correctivo, asegurar la disponibilidad y rendimiento de los elementos que componen la planta. En la figura 9 se demuestra esto gráficamente.

Este tipo de mantenimiento se basa en la realización de un seguimiento del estado del equipo mediante monitorizaciones que permiten realizar sustituciones y reparaciones cuando estos no se encuentren en buen estado, sin necesidad de realizar ciertas inspecciones, y reducir los fallos imprevistos por medio de un programa de detección de anomalías.

Una de las tareas más importantes que el mantenimiento preventivo conlleva es el planeamiento adecuado de las tareas que deben realizarse en la planta. Si esto se consigue se podrá atacar al problema y a su raíz antes que éste se produzca. Será importante que se acompañe al mantenimiento con un historial que indique cuánto tiempo y cuantos operarios son necesarios para llevar a cabo las tareas, de manera que el programa mejore a medida que se realice.

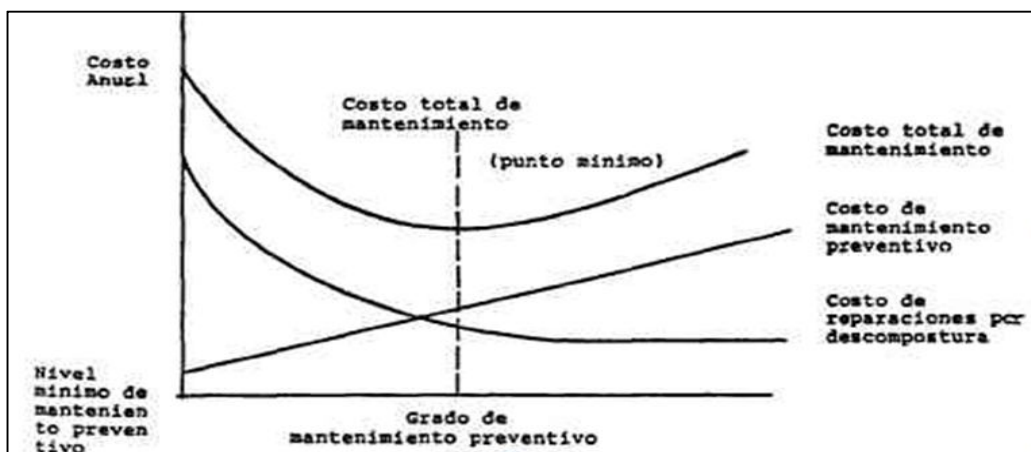
Este tipo de programas de mantenimiento reporta un gran ahorro de costes, ya que además de detectar los fallos de manera precoz permite programar con suficiente antelación el tiempo de reparación y los suministros y mano de obra que requerirá la tarea. Dado que el mantenimiento predictivo se

basa en la monitorización de los parámetros que están relacionados con fallos en los equipos puede aprenderse a medida que se opera la maquinaria, de manera que los fallos reiterados pueden llegar a erradicarse.

Estas técnicas requieren que los elementos gocen de indicadores suficientemente relacionados con el estado del equipo, además de la posibilidad que estos sean vigilados y medidos durante su vida útil. Su principal inconveniente, es la dificultad que conlleva obtener una respuesta clara y segura, ya que no existe ningún parámetro ni conjunto de parámetros que revele a la perfección el estado del equipo.

La vigilancia continua no es viable, tampoco, en la mayoría de elementos y solo supone una ventaja realizarla en elementos muy críticos por lo que en general resulta periódica.

Figura 9. **Costos de mantenimiento**



Fuente: (Sánchez, 2007).

7.8.4. Cálculo de la mano de obra necesaria para el mantenimiento

- (13) H-H-MP = Horas hombre utilizadas en el mantenimiento preventivo.
- (14) H-H-MC = Horas hombre utilizadas en el mantenimiento correctivo.
- (15) H-HT = Horas hombre totales utilizadas en mantenimiento.
- (16) H-HT = H-H-MP + H-H-MC.
- (17) Porcentaje de mantenimiento preventivo = $(H-H-MP/H-HT)*100$
- (18) Porcentaje de mantenimiento correctivo = $(H-H-MC/H-HT)*100$

7.9. Inventario de repuestos

Los repuestos representan todos aquellos componentes que se pueden reemplazar en un sistema para mantener la continuidad operativa del mismo. Funcionalmente es la parte más pequeña en la que se puede subdividir una máquina. Los repuestos son importantes dentro de cualquier sistema productivo debido a que simplemente si no lo tiene disponible cuando lo necesita no se podrá restablecer el estado operativo de la máquina, en otras palabras la máquina no producirá hasta que no sea reemplazado el repuesto. Es debido a este impacto directo sobre la disponibilidad de los sistemas lo que los hace tan valiosos.

En el presente contexto, el objetivo fundamental de los almacenes (bodegas) de repuestos es dar soporte a las tareas de mantenimiento, tanto a las tareas planeadas como las que no lo están.

Esta definición pone el énfasis de las políticas de inventario en el entendimiento del origen de la demanda de repuestos: mantenimiento y operaciones. Muchas técnicas tradicionalmente utilizadas para optimizar las

tenencias de inventarios de repuestos fracasan justamente por olvidar mantenimiento y las operaciones, origen de la demanda de repuestos.

7.9.1 Inventario de repuestos en el mantenimiento

Los inventarios de repuestos representan todas aquellas partes y piezas que se encuentran almacenadas, con el fin de apoyar logísticamente las actividades de mantenimiento para alcanzar los objetivos primordiales de mantenimiento que son la alta disponibilidad a un costo racional. Sin embargo, estos repuestos tienen ciertas características esenciales, que los hacen especiales y los diferencian del resto de los inventarios.

La función es diferente; ya que generalmente los inventarios de producto terminado o materia prima tienen como función principal dar flexibilidad a las cadenas de suministro. Los inventarios de repuesto solo se determinan para apoyar las actividades de mantenimiento y en mantener los equipos disponibles.

Los niveles de inventario de productos terminados o materia prima pueden ser incrementados o reducidos por cambios en las velocidades de producción y programaciones, mejoramiento de la calidad, reducción en los tiempos de entrega, etc. Entre tanto los niveles de inventarios de repuestos dependen de como el equipo es usado o mantenido.

Los inventarios de repuestos no cuentan con los datos de confiabilidad lo suficientemente detallados para realizar una buena estimación de los mismos y por ello en muchos casos se sobredimensionan para cubrir el riesgo asociado de no contar con la información necesaria. La obsolescencia es un problema grave y característico de este tipo de inventarios.

Es importante que los niveles de inventario de repuestos se determinen equilibrando el riesgo de provocar una parada larga de los equipos debido a la indisponibilidad de un repuesto, los costos de almacenamiento y el riesgo de que el repuesto se convierta en obsoleto antes de ser usado.

Sin embargo, es muy común que las empresas no presten especial atención a sus inventarios de repuestos, debido a que el almacenamiento de estos repuestos no genera ningún beneficio a la empresa sino hasta el momento de ser necesitados.

Además al igual que el resto de los inventarios representan un capital inmovilizado que disminuye el flujo de caja de las organizaciones, con la diferencia de que estos no tienen la potencialidad de convertirse en una ganancia para la empresa, sino por el contrario a medida que pasa el tiempo y no es utilizado aumentan sus probabilidades de que se deteriore o se convierta en obsoleto, generando pérdidas a las organizaciones a las cuales le serían útiles.

7.9.2. Costos ocultos en el inventario de repuestos

El costo del capital asociado en la pieza de recambio tiene un 15 % anual del valor total de cada repuesto nuevo. Desde el punto de vista del costo de funcionamiento del espacio de almacenamiento, impuestos que se pagan sobre la propiedad, el costo de la energía que se utiliza en el almacenamiento, seguros, gastos de mantenimiento significa un 5 % del valor de cada ítem.

El costo de la ocupación de espacio, alquiler y amortización corresponde al 8 %. EL costo de la contracción del inventario la obsolescencia deterioro, robo y contaminación corresponde entre el 5 al 10 %. En resumen si se realiza

el análisis del costo real de administrar los artículos del inventario por año puede llegar a un valor de 30 al 40 % del valor del repuesto nuevo.

7.9.3. Manejo de inventario de mantenimiento

El planeamiento y control del inventario apropiado de las piezas de repuesto es un componente crítico de un programa eficaz de la gerencia de activo. Si las piezas neumáticas no están al alcance cuando son necesitadas para el mantenimiento rutinario o las reparaciones, el tiempo muerto se prolongará más de lo necesario lo que traerá como consecuencia que la producción se vea afectada.

Al existir en la bodega una gran cantidad de repuestos neumáticos, la empresa incurre en costos excesivos y gastos indirectos de llevar el inventario, por lo que surge la necesidad de implementar estrategias adecuadas para manejar el inventario de repuestos para ayudar a la gerencia eficaz del activo.

7.9.4 Modelo EOQ (tamaño de lote económico)

El objetivo principal de este modelo es minimizar el costo de operación y del sistema del inventario. Los costos relevantes son el costo de mantenimiento en el inventario y costos de procura del repuesto. El tamaño de lote económico Q que minimiza el costo total del inventario es determinado de la siguiente fórmula:

$$(1) \quad Q^* = \sqrt{\frac{2\bar{D}S}{I_c}}$$

En donde:

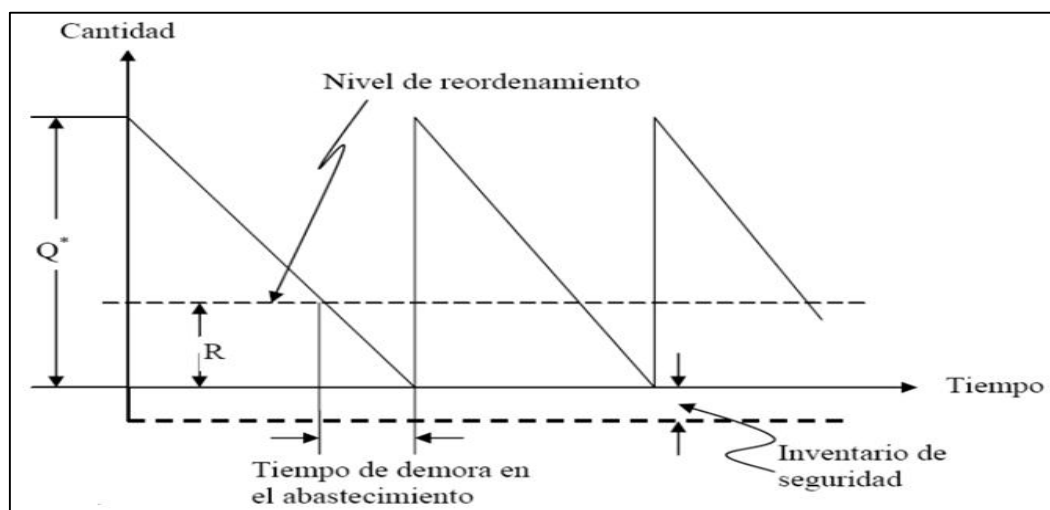
D = demanda esperada anual

S = costo de ordenamiento más costo del faltante

I_c = costo de mantención en inventario de una unidad al año

Gráficamente se puede representar como lo muestra la figura a continuación.

Figura 10. **Modelo EOQ**



Fuente: (Lameda, 2012).

El nivel de reordenamiento corresponde al número de ítems del inventario para la cual la nueva orden de compra debe de ser emitida. Este punto debe ser determinado y es función del tiempo demora en el abastecimiento y riesgo que se desee asumir de no tener repuestos durante el período de abastecimiento. Los parámetros de demanda y desviación estándar durante el período de abastecimiento se calcula como sigue:

$$D_L = t_t \times \bar{D}$$

En donde:

D_L = demanda durante el período de abastecimiento

t_t = tiempo de demora en el abastecimiento (en años)

Y para la desviación estándar se tiene:

$$\sigma_L = \sigma \times \sqrt{t_t}$$

En donde:

σ_L = desviación estándar para el período de abastecimiento

σ = desviación estándar de la demanda anual del repuesto

El *stock* de seguridad dependerá de dos factores que el administrador debe equilibrar, por un lado está el riesgo de no tener un repuesto durante el período de abastecimiento y por otro lado el costo que significa tener un inventario alto de repuestos. Esta cantidad está destinada a utilizarse en el caso que se produzca un alza de la demanda media durante el período de espera por reposición del repuesto. Para determinar el nivel de inventario de seguridad se utiliza el concepto de nivel de servicio que se expresa como:

Nivel de servicio = 1 - probabilidad de falta de repuesto.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE

PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

HIPÓTESIS

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Logística en las compras de repuestos

1.2. Productividad

1.3. Análisis financiero

1.4. Valorización económica de proyectos industriales

1.5. Planeación estratégica

1.6. Eficiencia energética

1.7. Mejora continua

2. PROPUESTA DE LA MEJORA

2.1. Tratamiento del aire comprimido

2.1.1. Filtración

2.1.2. Secado

2.1.3. Lubricación

- 2.2. Diseño de actuadores neumáticos
- 2.3. Dimensionamiento de válvulas neumáticas
- 2.4. Eficiencia energética
- 2.5. Vida útil de los cilindros neumáticos
- 2.6. Vida útil de las válvulas neumáticas
- 2.7. Pronósticos de vida útil
- 2.8. Creación de tablas de vida útil
- 2.9. Eliminación de fugas de aire
- 2.10. Corrección de sobredimensionamiento neumático
- 2.11. Corrección de sobredimensionamiento energético
- 2.12. Mantenimiento correctivo versus mantenimiento predictivo
- 2.13. Costos de mantenimiento
- 2.14. Análisis de costos
- 2.15. Minimizar los paros de producción
- 2.16. Cálculo de aumento de la productividad
- 2.17. Factibilidad del proyecto

3. SEGUIMIENTO Y CONTROL

- 3.1. Auditorías
- 3.2. Tipos de auditorías a realizar
 - 3.2.1. Aire comprimido
 - 3.2.2. Energía eléctrica
 - 3.2.3. Fugas de aire comprimido
 - 3.2.4. Repuestos neumáticos
 - 3.2.5. Mediciones energéticas
- 3.3. Programas de control
- 3.4. Recuento de paros de producción
- 3.5. Valorización económica del proyecto de optimización de calidad del aire

3.6. Maximizar la productividad del aire comprimido

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

4.2. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ANEXOS

9. METOLOGÍA

9.1. Variables e indicadores

Para este trabajo se utilizará el método de investigación retrospectiva, longitudinal, descriptiva y analítica.

Es retrospectiva porque registra información sobre hechos ocurridos con anterioridad a la investigación y el registro de la misma continua según los hechos.

Longitudinal porque se estudian variables como la calidad del aire, humedad relativa, el tratamiento del aire comprimido a lo largo de un período que varía conforme se desarrolla la investigación.

Descriptiva porque comprende, la descripción, el registro, análisis e interpretación de los fenómenos como la corrosión, abrasión y desgaste que sufren los elementos neumáticos al ser utilizados con aire comprimido de mala calidad.

Analítica explicativa porque se estudiará la causa o factor de riesgo que se obtiene al utilizar los equipos neumáticos con aire comprimido que no está tratado adecuadamente. A continuación se muestran las variables y los indicadores de la investigación en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Variables e indicadores**

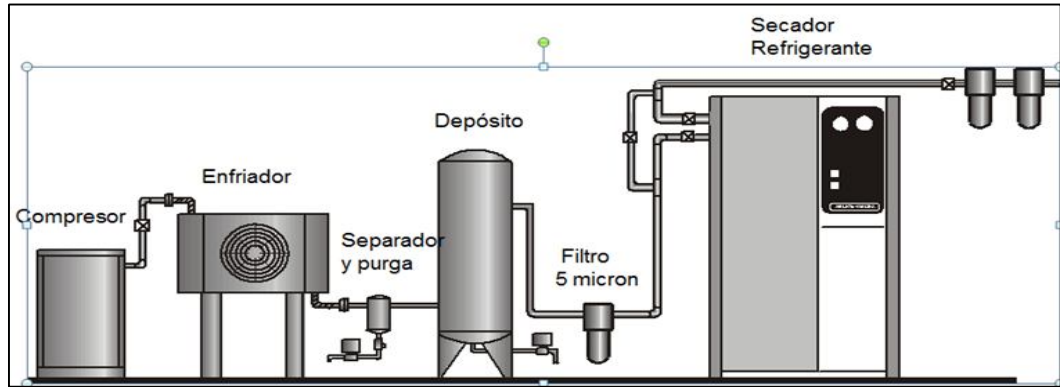
Variables	Indicadores	Observaciones
Calidad del aire comprimido.	Cantidad de partículas sólidas, aceite y condensado.	Se desea el 100% cumplimiento de la norma ISO 8573:1
Vida útil de los cilindros y válvulas neumáticas.	Número de ciclos o kilómetros recorridos	Se desea alcanzar el 90%.
Mantenimiento correctivo.	Número de fallas que ocurren antes de alcanzar la vida útil.	Se busca obtener eficiencia del 90%.
Mantenimiento preventivo.	Ahorro producido por la eliminación de mantenimiento correctivo.	Se busca reducir los costos en un 50%.

Fuente: elaboración propia.

9.2. Fase 1: observación

Se observarán, buscarán y localizarán los cilindros y válvulas neumáticas que posean fugas de aire por el desgaste de las juntas, el cual fue provocado por la calidad del aire que circula por el circuito neumático. Las fugas serán determinadas por medio de un sensor sonoro de baja frecuencia, el cual está diseñado para identificar el sonido que no es perceptible por el oído humano por medio de un dispositivo que detecta la frecuencia que producen las fugas del aire comprimido. En la figura 11 se muestra la distribución del aire comprimido.

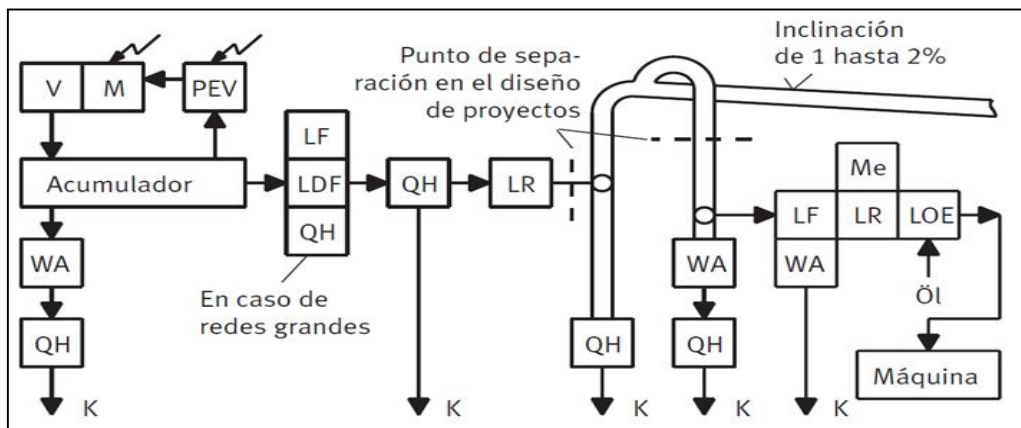
Figura 11. Distribución del aire comprimido



Fuente: (Hesse, 2002).

El diseño de la red del aire comprimido debe de cumplir normas necesarias para aumentar la calidad del aire. Se revisarán y rediseñarán las redes de distribución del aire comprimido para que cumplan con el diagrama que se presenta en la siguiente figura.

Figura 12. Diagrama de red del aire comprimido



Fuente: (Depper, 1990).

9.3. Fase 2: análisis del aire comprimido

Se evaluarán las unidades de mantenimiento (FRC), purgas de condensado (WA), separadores de agua (LWS), secadores y elementos filtrantes de partículas sólidas para determinar la calidad del aire que circula por el circuito neumático, también la frecuencia de recambio de los elementos que conforman el sistema de tratamiento del aire comprimido.

Por medio de la carta psicrométrica y de los datos atmosféricos del departamento de Escuintla se obtendrán las propiedades físicas del aire comprimido proveniente de la atmósfera para determinar el punto de rocío y la humedad relativa del aire y así se determinarán la cantidad de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos que circulan en los circuitos neumáticos para diseñar los procedimientos adecuados para el tratamiento del aire contaminado, comparado con la calidad del aire que los fabricantes de los elementos neumáticos sugieren para el desempeño adecuado de sus equipos.

Se tomarán las medidas y acciones necesarias para implementar una calidad mínima del aire comprimido por medio del tratamiento recomendado en la siguiente tabla que viene aplicada a la Norma DIN ISO 8573-1.

Tabla IX. Norma DIN ISO 8573-1

Aplicaciones	Cuerpos sólidos (μm)	Punto de condensación del agua ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Contenido máx. de aceite (mg/m^3)	Clase de filtración recomendada
Minería	40	–	25	40 μm
Lavandería	40	+10	5	40 μm
Máquinas soldadoras	40	+10	25	40 μm
Máquinas herramienta	40	+3	25	40 μm
Cilindros neumáticos	40	+3	25	40 μm
Válvulas neumáticas	40 o bien 50	+3	25	40 o bien 50 μm
Máquinas de embalaje	40	+3	1	5 μm – 1 μm
Reguladores finos de presión	5	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire de medición	1	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire en almacén	1	–20	1	5 μm – 1 μm
Aire para aplicación de pintura	1	+3	0,1	5 μm – 1 μm
Técnica de detectores	1	–20 o bien –40	0,1	5 μm – 1 μm
Aire puro para respirar	0,01	–	–	–0.01 μm

Fuente: (ISO, 2010).

9.4. Fase 3: tratamiento del aire

Se diseñarán e implementarán los procedimientos adecuados para la producción de un aire comprimido de buena calidad tratando de obtener las propiedades físicas que los fabricantes sugieren para el uso adecuado de sus equipos. Se colocarán secadores de absorción a la salida de los compresores, purgas en las tuberías, unidades de mantenimiento al pie de cada máquina, purgas automáticas en la red de distribución del aire, lubricadores en las unidades de mantenimiento y todas las consideraciones necesarias para mejorar la calidad del aire.

La metodología adecuada para la preparación adecuada del aire comprimido debe cumplir con la Norma ISO 8573-1:2010 que se describe a continuación en la tabla X.

Tabla X. Norma ISO 8573-1:2010

ISO 8573-1:2010 Clase	Partículas sólidas			Concentración en masa mg/m ³	Agua		Aceite
	0,1 – 0,5 µm	0,5 – 1 µm	1 – 5 µm		Punto de condensación bajo presión vapor °C	Líquido g/m ³	Proporción total de aceite (líquido, aerosol y niebla) mg/m ³
0	Según especificación del usuario de la unidad, exigencias más estrictas que la clase 1						
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	–	≤ -70	–	0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	–	≤ -40	–	0,1
3	–	≤ 90.000	≤ 1.000	–	≤ -20	–	1
4	–	–	≤ 10.000	–	≤ +3	–	5
5	–	–	≤ 100.000	–	≤ +7	–	–
6	–	–	–	≤ 5	≤ +10	–	–
7	–	–	–	5 – 10	–	≤ 0,5	–
8	–	–	–	–	–	0,5 – 5	–
9	–	–	–	–	–	5 – 10	–
X	–	–	–	> 10	–	> 10	> 10

Fuente: (ISO 2010).

Para cumplir con la Norma DIN 8573-1:2010, es necesario aplicar el tratamiento del aire comprimido con los equipos adecuados como los reguladores de presión, filtros de partículas sólidas, lubricadores, derivaciones, presóstatos, secadores, separadores de agua, etc., para lo cual se debe de seleccionar por medio de las características propias de cada equipo para poder realizar la función deseada.

Esta norma también clasifica el aire según su calidad, como se muestra en la siguiente tabla.

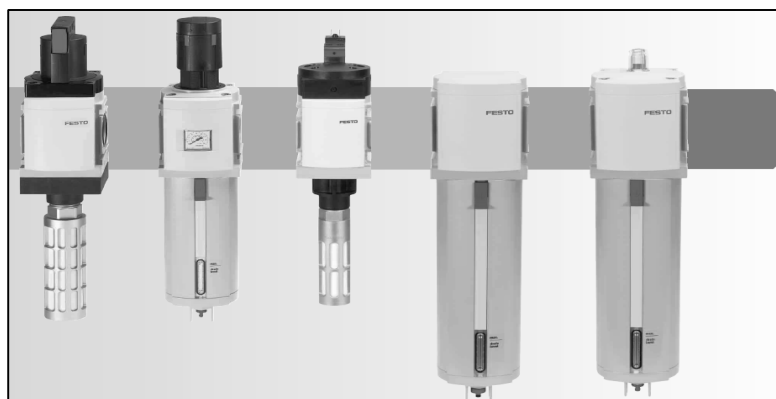
Tabla XI. Clases de calidad del aire

Clase	Tamaño máx. de las partículas en μm	Densidad máxima de las partículas en mg/m^3	Punto máx. de condensación bajo presión en $^{\circ}\text{C}$	Contenido máx. de aceite residual en mg/m^3
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1,0
4	15	8	+3	5
5	40	10	+7	25
6	-	-	+10	-
7	-	-	sin definir	-

Fuente: (ISO, 2010).

Los equipos de tratamiento de aire se colocarán al pie de las máquinas y se formará un solo bloque, que incluye cada uno de los elementos para que la función de tratamiento del aire se realice por un solo bloque como se muestra en la figura 13.

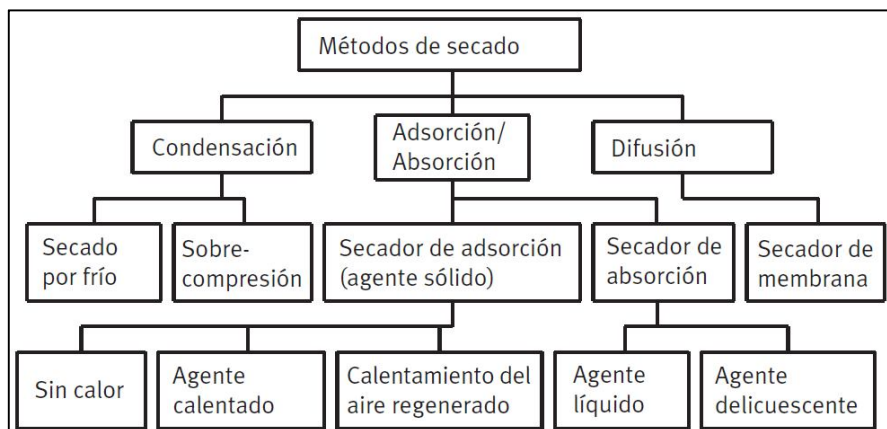
Figura 13. Tratamiento del aire comprimido



Fuente: (Festo, 2011).

Se implementará el secado del aire comprimido por medio de la metodología del secado del aire dependiendo la aplicación y características de la planta de producción así como de la red del aire comprimido, en la siguiente figura se indica la metodología para el secado.

Figura 14. **Secado del aire comprimido**

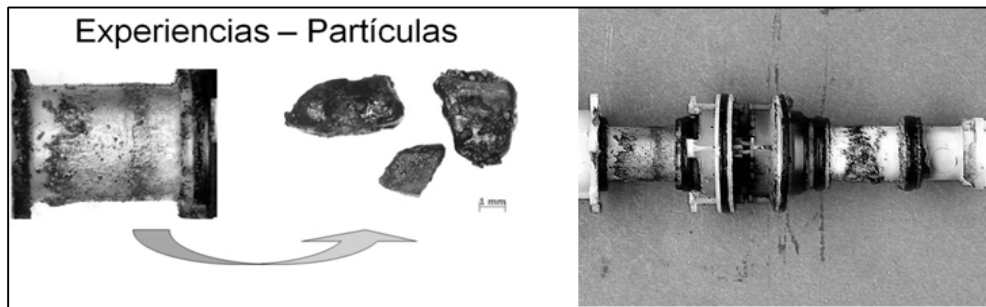


Fuente: (Hesse, 2002).

9.5. Fase 4: evaluación de los cilindros y las válvulas

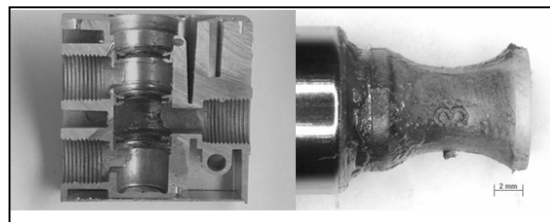
Se inspeccionarán los cilindros y las válvulas neumáticas en su parte exterior así como en la parte interior para determinar el estado y desgaste de las juntas que no efectúen cierre hermético lo que provoca fugas de aire. Se analizará la corrosión producida por el condensado que circula por las tuberías de distribución de aire comprimido y la abrasión que es provocada por las partículas sólidas en suspensión que forman parte de los contaminantes del aire comprimido. En la figura 15 se pueden observar los daños que se producen en las válvulas neumáticas y en la figura 16 se muestra la humedad en una válvula.

Figura 15. **Daños en válvulas neumáticas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Experiencias con humedad**



Fuente: elaboración propia.

9.6. **Fase 5: datos estadísticos de recambio de piezas**

Se recolectarán datos estadísticos del tiempo desde la instalación de los artículos nuevos, hasta el tiempo en el cual es necesario realizar mantenimiento correctivo a los cilindros y válvulas neumáticas, mientras se evalúa los daños que muestran las juntas y las partes móviles internas de los componentes con el fin de tomar acciones enfocadas hacia el tratamiento del aire comprimido para minimizar los daños y así aumentar la vida útil de los elementos neumáticos.

Posteriormente se realiza el mantenimiento correctivo, se toman datos estadísticos de la durabilidad de los elementos neumáticos a los que se les aplicó mantenimiento correctivo hasta el punto en el que fallan nuevamente.

También se recolectarán datos estadísticos referentes a la frecuencia de compra de los cilindros y válvulas neumáticas, para analizar los gastos que conllevan los recambios de piezas que tengan vida útil inferior a lo que los fabricantes recomiendan en sus tablas.

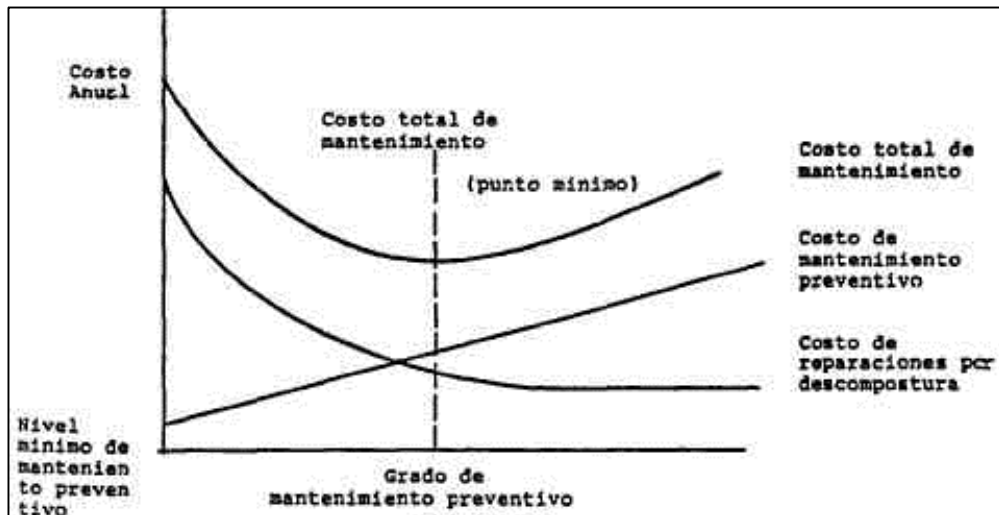
9.7. Fase 6: comparación de datos

Se compararán los datos de los resultados de la vida útil de los elementos neumáticos dada por los fabricantes con los datos obtenidos del análisis de los elementos que operan en el departamento de Escuintla. La comparación se realizará con el objetivo de poder determinar una relación matemática entre ambas vidas útiles y así poder pronosticar la vida útil de los componentes.

9.8. Fase 7: análisis de costos

Se realizará una comparación de los costos efectuados por la realización de mantenimientos correctivos implementados durante las fallas ocurridas en los cilindros y válvulas neumáticas, con los mantenimientos preventivos que se realizarán hasta alcanzar la vida útil estipulada por los fabricantes tal como se muestra en la figura a continuación.

Figura 17. Gráfico de costos de mantenimiento



Fuente: (Sánchez, 2007).

9.9. Fase 8: análisis de fugas y aumento de eficiencia energética

Se cuantificarán el caudal de aire comprimido que se pierde por las fugas en los elementos neumáticos y conociendo la presión de trabajo se relacionará con la potencia eléctrica de los compresores para determinar el consumo eléctrico posterior a la eliminación de las fugas. Conociendo la tarifa de la Empresa Eléctrica de Guatemala se determinará el costo y ahorro que se obtendrá para elevar la eficiencia y productividad de las plantas de producción.

9.10. Muestreo

Se realizará un muestro aleatorio en cualquiera de las plantas que operen con circuitos neumáticos en el departamento de Escuintla. Todas las piezas tendrán la misma probabilidad de ser analizadas.

9.10.1. Tamaño de la muestra

El estudio se realizará en plantas de producción continua que operan en el departamento de Escuintla, analizando los elementos neumáticos que según los historiales presentan una mayor frecuencia a las fallas inesperadas que provocan paros en la producción.

9.11. Realizar un diagnóstico de la situación actual

Se realizará un estudio estadístico de la frecuencia del recambio de piezas según los datos de las plantas de producción y el costo económico que produce el mantenimiento correctivo, un análisis Ishikawa sobre las causas de las fallas de los elementos neumáticos antes de alcanzar su vida útil, así como un estudio experimental de la calidad del aire comprimido con equipos diseñados para tal análisis.

10. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se utilizará el estudio de la estadística descriptiva por medio de la cual se recolectarán, organizarán, presentarán y describirán los datos de estudio de la información numérica como lo son la vida útil de los componentes neumáticos, cantidades de contaminantes en el aire, la cantidad de fallas ocurridas en los equipos y los costos de los mantenimientos correctivos y preventivos.

Por medio de los datos obtenidos por la implementación de la estadística descriptiva se construirán tablas y gráficos que simplificarán las conclusiones que tendrán como resultado las mejoras a implementarse directamente. Asimismo, con la estadística descriptiva se realizarán las conclusiones del estudio.

Por medio de la estadística descriptiva se construirá el gráfico que relacione la vida útil dada por el fabricante versus la vida útil real en la región de Escuintla con el objeto de calcular el factor que relacione directamente el comportamiento de la vida útil real.

Realizar el cálculo del costo de producir 1 l/min a 6 bar de aire comprimido producido por las fugas, por medio de tablas dadas por los fabricantes de compresores. Por medio del equipo neumático se determinará el caudal total en l/min, producido por las fugas de aire comprimido.

Por medio de las tablas proporcionadas por los fabricantes de los compresores se determinará la cantidad de energía eléctrica en kilowatt/hora necesaria para la producción del caudal total debido a las fugas de aire

comprimido. Conociendo el valor en quetzales de la energía eléctrica en kwh se podrá obtener el costo de producir el caudal que se desperdicia en las fugas del aire comprimido en toda la planta de producción.

Se procederá a calcular la productividad del aire comprimido antes y después de optimizar la vida útil de los elementos neumáticos.

10.1. Recursos

Para la realización de esta investigación es necesario utilizar los recursos humanos, institucionales y los materiales que se desglosan a continuación.

10.1.1. Humanos

- Maestrando: Francisco Daniel Juárez Estrada
- Asesor: Otto Miguel Hurtarte Hernández

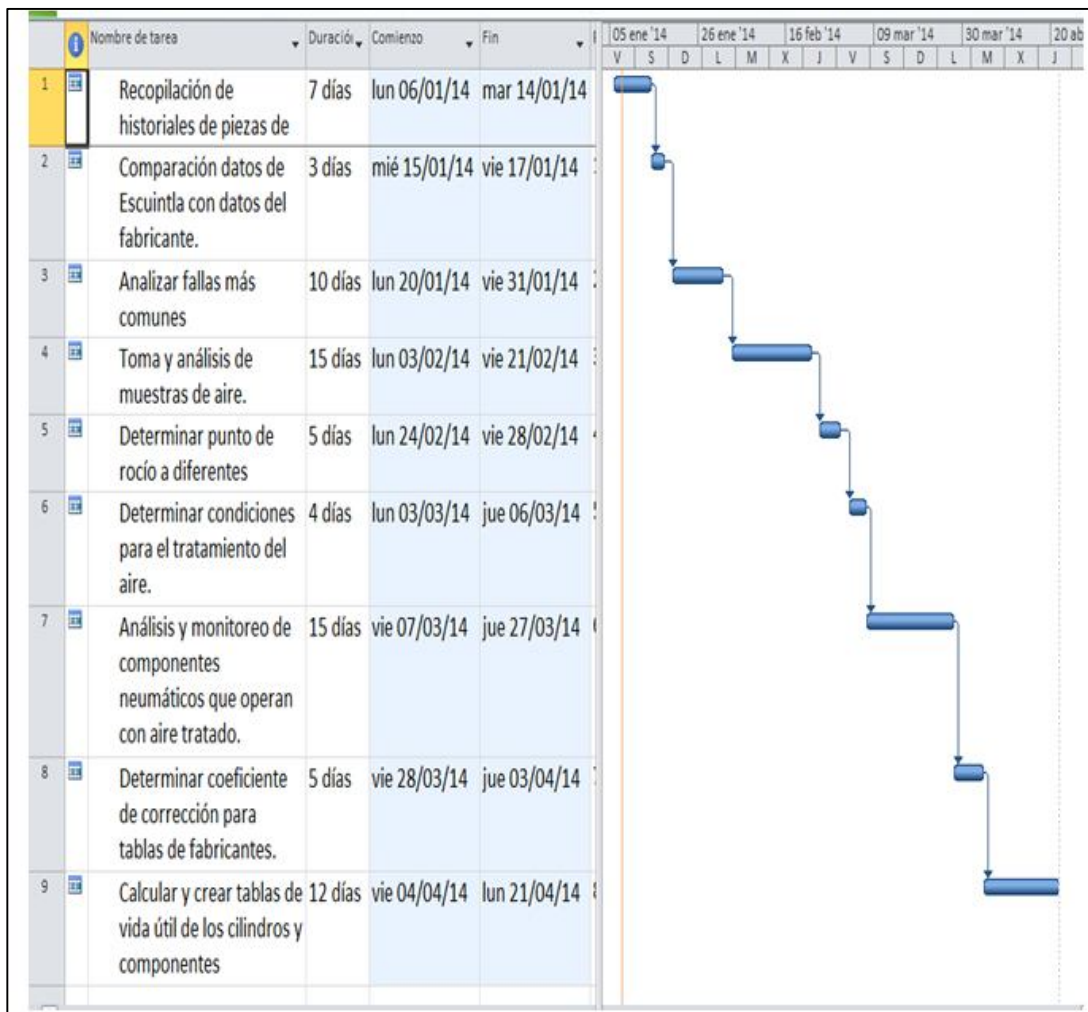
10.1.2. Institucionales

- Escuela de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Automatización y Control Industrial, S. A.
- Areca.

11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se presenta a continuación la descripción de las tareas a ejecutar y el período programado para su inicio y finalización.

Figura 18. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS

Los recursos que serán necesarios para poder desarrollar la investigación propuesta incluyendo los materiales e insumos, así como también el recurso humano y los costos de capacitación se expresan en una cuantificación del proyecto en las siguientes tablas.

Tabla XII. **Recursos físicos y financieros (a)**

Rubros	Costo (Q)
Unidad de mantenimiento FRC	1 200,00
Separador de agua LWS	3 500,00
Medidor de flujo	4 000,00
PLC	3 800,00
Computadora	4 000,00
Accesorios electrónicos	1 000,00
Total materiales e insumos	20 800,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Recursos físicos y financieros (b)

Recurso humano	Costo unitario (Q)	Costo total (Q)
Estudiante de maestría	100,00/h	12 000,00 / 6 meses
Asesor de tesis	100,00/h	2 500,00 / 6 meses
Total recurso humano		14 500,00

Fuente: elaboración propia.

El costo total del proyecto asciende a Q 35 300.00.

Todo el equipo pertenece a Acisa y será prestado para la medición y toma de datos de la investigación sin costo alguno, por lo tanto se cuenta con los recursos necesarios para realizar la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beater, P. (2007). Pneumatic drives. Berlin: Springer.
2. Bronner, M. (2001). Compressed air maintenance service. Esslingen: Festo.
3. Cacatzum, J. V. (2007). El municipio de Escuintla, Guatemala.
4. Croser, P. (1989). Pneumatik. Berlin: Editorial Springer.
5. Croser, P. (2003). Neumática básica. Esslingen: Festo pneumatic.
6. Deppert, W. (1990). Pneumatik. Wurzburg. Editorial Vogel.
7. Englar, P. (2005). Pneumatic solutions for extreme STOL aircraft critical technologies. SAE.
8. Feldman, K. (1985). Distribución del aire. Editorial Resh.
9. Festo. (2006). Service Life. Esslingen: Festo pneumatic.
10. Gómez, F. (1998). Tecnología de mantenimiento industrial. Murcia.
11. Higgins, R. (2002). Maintenance Engineering Handbook.

12. Hoffman, E. (1987). Neumática en construcción. Wurzburg. Editorial Vogel.
13. Insivumeh. (2007). Monitoreo de la calidad del aire en la costa sur. Guatemala.
14. ISO. (2010). Normas ISO.
15. Mark, W. (1987) Servicio y mantenimiento de sistemas neumáticos. Esslingen, Festo.
16. Niembro, C. (2000). Neumática Básica. México, D.F.: Festo pneumatic.
17. Pérez, J. (2004). Sistema integrado para la modernización y el análisis de la calidad del aire en modo operacional. España: Universidad Politécnica de Madrid.
18. Prede, G. (1998). Electroneumática. Berlin. Editorial Springer.
19. Quiroga, J. (2010). Mantenimiento a sistemas neumáticos. Conalep.
20. Rothe, M. (2000). Generación y tratamiento del aire comprimido. Essen. Editorial Vulkan.
21. Sánchez, F (2007). Mantenimiento mecánico de máquinas. Castellón.
22. Vogel, G. (2001). Neumática fascinante. Wurzburg. Editorial Vogel.