



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

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN: MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE
COMPRESORES DISMINUYENDO LAS FUGAS DE AIRE POR DETECCIÓN CON
ULTRASONIDO, EN EL SISTEMA DE UNA PLANTA EMBOTELLADORA**

Amílcar Pérez Robles

Asesorado por el Ing. Julio Francisco Ramírez Hernández

Guatemala, junio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN: MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE
COMPRESORES DISMINUYENDO LAS FUGAS DE AIRE POR DETECCIÓN CON
ULTRASONIDO, EN EL SISTEMA DE UNA PLANTA EMBOTELLADORA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

AMÍLCAR PÉREZ ROBLES

ASESORADO POR EL ING. JULIO FRANCISCO RAMÍREZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Anacleto Medina Gómez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

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: MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE COMPRESORES DISMINUYENDO LAS FUGAS DE AIRE POR DETECCIÓN CON ULTRASONIDO, EN EL SISTEMA DE UNA PLANTA EMBOTELLADORA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha enero de 2017.

Amílcar Pérez Robles



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 2418-8000 Ext. 86226



AGS-MGIPP-015-2017

Guatemala, 20 de mayo de 2017.

Director
Francisco Gómez Rivera
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
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 **Antony Josue Pérez Matul** carné número **201020464**, 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. Walter Emilio Ramírez Córdova
Asesor (a)

Ing. Walter E. Ramírez C.
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO 10,049

Dra. Alba Maritza Guerrero
Coordinadora de Área
Gestión de Servicios

ALBA MARITZA GUERRERO SPINOLA
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF.DIR.EMI.080.017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA REDUCIR EL DESPERDICIO EN LA FABRICACIÓN DE ENVASES AEROSOL DE LA EMPRESA GRUPO ZAPATA GUATEMALA, S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Antony Josue Pérez Matul**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DIRECTOR a.i.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, mayo de 2017.

/mgp

Universidad de San Carlos
de Guatemala

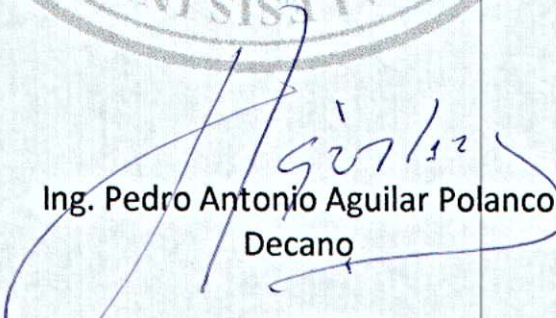


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 265.2017

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 Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: METODOLOGÍA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA REDUCIR EL DESPERDICIO EN LA FABRICACIÓN DE ENVASES AEROSOL DE LA EMPRESA GRUPO ZAPATA GUATEMALA, S. A.**, presentado por el estudiante universitario: **Antony Josué Pérez Matul**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, junio de 2017

/gdech



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
4. JUSTIFICACIÓN	7
5. OBJETIVOS	9
5.1. General.....	9
5.2. Específicos	9
6. ESQUEMA DE SOLUCIÓN Y NECESIDADES A CUBRIR.....	11
7. MARCO TEÓRICO.....	13
7.1. Compresión del aire	13
7.1.1. Aplicaciones del aire comprimido	13
7.1.2. Termodinámica en la compresión de aire	15
7.1.3. Unidades de medición	18
7.2. Compresores	18
7.2.1. Compresores de desplazamiento positivo	20
7.2.1.1. Compresores de pistón.....	20
7.2.2. Compresores de tornillo.....	22

	7.2.2.1.	Compresores de paletas rotativas.....	23
	7.2.3.	Compresores dinámicos o turbocompresores	24
	7.2.3.1.	Compresores centrífugos	25
7.3.		Componentes de un sistema de aire comprimido Industrial.....	26
	7.3.1.	Equipo refrigerador posterior.....	26
	7.3.2.	Depósito de acumulación	27
	7.3.3.	Filtros.....	30
	7.3.4.	Secado del aire comprimido	31
	7.3.5.	Separador de aceite / agua	32
7.4.		Diseño de la instalación	33
	7.4.1.	Generalidades	33
	7.4.2.	Estimación de consumos.....	35
	7.4.3.	Cálculo de las pérdidas de carga	35
	7.4.4.	Dimensionado del compresor y depósitos.....	41
7.5.		Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido.....	42
	7.5.1.	Uso apropiado del aire comprimido.....	43
	7.5.2.	Reducción de las fugas	45
	7.5.3.	Estimación del porcentaje de fugas.....	46
	7.5.4.	Detección de fugas.....	48
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	49
9.		METODOLOGÍA	51
	9.1.	Tipo de estudio.....	51
	9.2.	Fases de estudio	51
	9.2.1.	Fase 1: Exploración bibliográfica.....	51
	9.2.2.	Fase 2: Recolección de datos	51
	9.2.3.	Fase 3: Análisis de datos	55
	9.2.4.	Fase 4: Discusión de resultados	56

	9.2.4.1.	Discusión económica.....	56
	9.2.4.2.	Discusión ambiental.....	56
10.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	59
11.		CRONOGRAMA.....	61
12.		FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	63
13.		REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de compresor de tornillo	22
2.	Aftercooler con deshumificador incorporado	27
3.	Depósito de acumulación vertical.....	29
4.	Detector de fugas ultrasónico.....	53

TABLAS

I.	Distribución caídas de presión	36
II.	Rugosidad en los materiales	39
III.	Tabla III. Costos por fugas	46
IV.	Reconocimiento de trabajo actual de compresores	52
V.	Tabulador de detección de fugas	54
VI.	Pérdida anual por fugas	57
VII.	Factibilidad de estudio.....	63

1. INTRODUCCIÓN

La generación y distribución de aire comprimido dentro de la planta forma parte fundamental para la producción y energización de los elementos necesarios. A lo largo de la distribución, instalación de tuberías, accesorios, válvulas existen fugas que hacen ineficiente el sistema. Se hace necesario entonces conocer la relación entre las fugas de aire comprimido y la energía eléctrica utilizada para su producción y por lo tanto, los costos equivalentes a estas pérdidas.

Por lo que la propuesta para determinar esta relación es hacer mediciones a lo largo de las instalaciones, utilizando equipo especial para la detección de fugas y determinar así la cantidad en metros cúbicos de aire que se está escapando, lo que permitirá tener un parámetro real para hacer la comparación de pérdidas por fugas.

Al final, el desarrollo de este estudio se espera tener un sistema de aire comprimido más eficiente, dará un aporte de una metodología para el ahorro energético y contribuirá con el área de mantenimiento con la localización de fallas.

La recolección de datos dará la base para determinar la energía que se está dejando escapar por fugas. Se hará de la siguiente manera: medición del consumo energético de los compresores, conocer el factor de potencia que maneja la planta, localización de fugas a lo largo de los anillos de aire comprimido y accesorios. Para la localización de fugas, se utilizará un detector de fugas por ultrasonido con apuntador laser para su exacta localización. El

alquiler por el uso de este equipo es una cuota accesible, el pago de este correrá por cuenta propia.

En el capítulo 1, se muestra el marco teórico y conceptual de la investigación que se utilizará como referencia para el desarrollo de la investigación, como los usos que actualmente se tienen del aire comprimido en la industria, la termodinámica del aire comprimido, se hace una descripción detallada de los tipos de compresores que existen o de mayor aplicación. En el capítulo 2, se definen los métodos y técnicas que se utilizarán para el estudio, como el tipo de estudio, se definen las variables y las técnicas para el desarrollo de la metodología.

En el capítulo 3, se tabularán datos recopilados descritos en la metodología, para su análisis y discusión de los resultados en el capítulo 4.

2. ANTECEDENTES

Se han realizado ya varios estudios respecto a las fugas de aire en instalaciones mecánicas, a continuación se mencionan algunos importantes:

En el artículo: “Potencial de ahorro de energía en los sistemas de filtración de aire comprimido”, Beko (2012), se calculó que en Europa de la potencia total de aire comprimido instalada se pierde entre un 20 % y 30 % aire que resulta caro producirlo se está dejando escapar.

En el artículo: “Estrategias para el ahorro de aire comprimido”, De Las Heras, Moreno y Fernández (2009), enfatizan que para mejorar el rendimiento de una instalación neumática se debe minimizar el consumo y reducir las pérdidas de energía pudiendo ahorrar hasta un 10 % en usos innecesarios. Minimizar se refiere a usar solo cuanto es necesario y no producir en exceso.

La tesis: “Ultrasonidos en el mantenimiento de plantas industriales”, Charray y Hurtado (2001), habla sobre la utilización de la técnica de ultrasonidos en el mantenimiento industrial, que se asocia a técnicas no destructivas, permite detectar problemas en instalaciones industriales, entre estos se encuentran fugas de vapor y gas, incluso la detección de daños en rodamientos, se calcula que se puede ahorrar hasta un 40 % en tiempo, aprovechado por detección de fugas y corrección.

Se encontró en el artículo: “Posicionadores inteligentes para válvulas de control”, González (2009), se describe otra técnica para la detección de fugas de aire y es utilizando posicionadores para válvulas de control, que son fugas

en la propia válvula, igualmente dan la ventaja de menor consumo de aire, es una pérdida solo para la válvula misma, pero que contribuye al ahorro general.

En el artículo: “Energía del aire comprimido”, Carranza, Restrepo, y Tibaquira (2004), se presenta la revisión y análisis del concepto energía sin flujo para el aire comprimido, también se menciona la importancia de hacer el análisis energético para los sistemas neumáticos.

En el artículo: “Tratamiento del aire comprimido”, Kaeser, (2006), se hace una lista de las diversas aplicaciones del aire comprimido y las diferentes maneras de limpieza, según su uso, y como cada método de limpieza representa diferentes costos, entre más pureza se requiera mayor será el costo para tratarlo, allí la importancia de cuidar que no haya fugas, el costo mínimo de tratarlo puede ser de hasta un 5 % del presupuesto de repuestos por mantenimiento.

El artículo: “Auditorías energéticas de instalaciones de aire comprimido”, Revista Fluidos (2007), hace conciencia sobre la importancia de la energía que contiene el aire comprimido, su cada vez mayor demanda en la industria, también se enfoca en enseñar a sus técnicos a hacer estudios sobre minimizar el consumo aire comprimido, evitar usos innecesarios, de manera que este sea lo menor posible, haciendo el sistema más eficiente.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aire comprimido es una forma de energía utilizada en los diversos equipos neumáticos en diferentes partes de la planta, el cual llega a estos por medio de líneas de distribución, es tubería que transporta el aire en condiciones de humedad, lubricación y presión controladas. En el trayecto de distribución se tienen fugas de aire, este fue producido en los compresores. No se tiene un estimado de la energía que es requerida para producir el aire en las fugas.

La planta cuenta con varias líneas de producción, cada una necesita líneas de distribución para su funcionamiento, la tubería utilizará accesorios necesarios y propios de la instalación como codos tes, reductores de diámetro y otros, en la unión de estos es en donde se encuentran las fugas, algunas se pueden localizar simplemente por el sonido que emiten, otras es necesario equipo especial para localizarlas, estas fugas significan una demanda adicional de aire sumada a la ya requerida por el propio equipo, elevando así la energía utilizada por los compresores para producirla.

Los compresores actúan para mantener la presión de trabajo requerida, al haber fugas trabajarán tiempo adicional para satisfacer esta demanda; además de los usos incorrectos que personal operativo hace del aire comprimido.

El uso inadecuado del aire es causado no solo por el personal propio, sino por terceras personas, aquellas que prestan servicios temporales a la empresa, la falta de supervisión adecuada también contribuye a agravar el problema.

La reacción requerida para atender paros por emergencia incide directamente en aumento de costos debido a compras hechas de emergencia, esto implica paros imprevistos para atender este tipo de reparaciones, utilización de recursos humanos y materiales para su corrección, todo esto provoca baja en los índices de productividad.

El consumo de energía eléctrica se incrementa, debido al trabajo extra que deben realizar los compresores, lo que significa un mayor costo en pago de energía eléctrica, esto hace que aumente el costo del producto y por lo tanto su rentabilidad se vea disminuida.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Cómo se puede aumentar la eficiencia de compresores corrigiendo las fugas de aire?.

Esta pregunta se descompone en varias preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el consumo de energía eléctrica por generación de aire comprimido de los compresores?
- ¿Cuál es la relación entre las fugas detectadas por ultrasonido y los tiempos de arranque de los compresores?
- ¿Cuál será el nuevo consumo de energía eléctrica corrigiendo las fugas de aire y que beneficios económicos representan?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía de la maestría en Energía y Ambiente.

Se conocerá la gestión energética en el sistema neumático que actualmente se tiene, así como la que se tendría utilizando el sistema de detección de fugas por ultrasonido y los costos asociados en ambos casos.

Dará un aporte al programa de mantenimiento preventivo y correctivo que se efectúa periódicamente, ayudando a hacer reparaciones más rápidas y precisas, ahorrando tiempo.

Tantos técnicos como ingenieros de mantenimiento se podrán beneficiar de este sistema para localizar fallas y corregirlas especialmente en lugares en donde antes no se tenía acceso a revisión; también beneficiarán a los ingenieros encargados de producción, por tener mayor confianza de continuidad en los equipos analizados.

El análisis también beneficiará al medio ambiente, debido que un ahorro en la demanda de energía eléctrica equivaldrá a un ahorro en las emisiones de CO₂ que una central térmica dejará de emitir por la disminución en la demanda.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Efectuar análisis de fugas de aire por ultrasonido en circuito de distribución para aumentar la eficiencia energética de los compresores.

5.2. Específicos

- Determinar el consumo de energía de los compresores.
- Determinar la relación entre total de fugas detectadas por ultrasonido y los tiempos de arranque de los compresores.
- Determinar nuevo consumo de energía eléctrica ya corregido, el problema de fugas y calcular beneficios económicos, luego de realizar las correcciones.

6. ESQUEMA DE SOLUCIÓN Y NECESIDADES A CUBRIR

El aire comprimido se almacena en depósitos o pulmones con el propósito de mantener una presión de trabajo constante, para evitar que los compresores se activen y apaguen en períodos cortos, al haber fugas, la demanda se incrementa haciendo que los arranques de los compresores sean más frecuentes, por lo que eliminando fugas y gastos innecesarios se disminuirán frecuencia en arranques, y con ello picos de voltaje, pues cada motor requiere una demanda pico de corriente en el arranque. Se hará medición de los arranques durante varios días, para tener un índice de medición así comparar con frecuencia de arranques post-correcciones. Cada uno de estos arranques representa un alto consumo energético.

La presente investigación aportará una metodología para el ahorro de energía eléctrica, a la cual le corresponde una cantidad equivalente de combustibles fósiles, los que se utilizarían para su generación, contribuyendo así a una menor emisión de CO₂, lo que será de beneficio para el medio ambiente.

Otro aporte que se mejorará es el factor de potencia, este es un indicador cualitativo y cuantitativo sobre el correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, toma valores entre 0 y 1, por lo que al hacer las correcciones se espera tenga una mejora, debido a que se tendrán menos arranques en los compresores los cuales ocupan altos picos de energía.

Con el análisis se establecerá un adicional al protocolo de mantenimiento que puede ser utilizado incluso en cualquier planta de producción que utilice

aire comprimido como medio de trabajo, utilizando los beneficios que representa, como continuidad de los procesos, economía propia de la empresa, mayor confianza en los equipos.

Las fugas que se encuentran algunas pueden ser fácilmente corregidas, el proceso de corrección es bastante sencillo, no requiere de gran manipulación mecánica, otras fugas que no se detectan fácilmente, debido a ruidos propios de la planta que se podrá hacer por medio del equipo de ultrasonido, el informe incluirá un aproximado de los CFM que se están perdiendo mensualmente, se espera que el departamento de mantenimiento adopte una línea en su revisión mensual con este sistema de detección de fugas, esto prevendrá la pérdida de aire almacenado para el cual se requirió energía para su producción.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Compresión del aire

7.1.1. Aplicaciones del aire comprimido

El aire comprimido tiene varias aplicaciones, debido a su adaptabilidad y facilidad de transporte y manipulación en comparación con el vapor de agua. El aire comprimido provee de energía para una gran multitud de operaciones de fabricación a equipos y máquinas como herramientas neumáticas, bombas, controles, pulverizadores, chorros de arena, martillos, taladros, para preparación de alimentos, operación de instrumentos.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, el aire comprimido y el gas se pueden dividir en energía, proceso y control. En el servicio de energía incluye aquellas aplicaciones en las que se utiliza aire, ya sea para producir movimiento o para ejercer una fuerza o ambos. Ejemplos, son actuadores lineales, herramientas neumáticas, dispositivos de sujeción, elevadores de aire, y transportadores neumáticos. En el proceso se define como cualquier aplicación en la que entra el aire u otro gas en un proceso en sí mismo. Ejemplos son la combustión, licuefacción y separación de mezclas de gases en componentes, la hidrogenación de aceites, de refrigeración, de aireación para ayudar en procesos biológicos y la deshidratación de los alimentos. Aplicaciones de control de aire o gas como los disparadores, arrancadores, paradas, moduladores, dicho de otra manera dirige las máquinas o procesos (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En algunas industrias, el aire comprimido puede estar limitado a servicio de energía por sí sola, como en la explotación de canteras y la construcción de carreteras. Otros pueden utilizar el aire sólo en servicio de proceso. Pero, en muchos casos, el aire comprimido se utiliza tanto en los servicios de energía y de proceso con control neumático dentro de una sola planta.

Las líneas de producción se pueden automatizar de manera rentable, cuando las cantidades de producción lo justifican. Ha habido muchas tendencias interesantes en el campo de la automatización, mediante la aplicación de sistemas neumáticos. Por ejemplo, circuitos de aire y controles neumáticos permiten la integración de las herramientas de aire convencionales y especiales y dispositivos auxiliares en máquinas automáticas individuales. Un sistema utiliza bloques de construcción o ensamble con un alto grado de capacidad de intercambiabilidad de herramientas y controles neumáticos. Técnicas de fluidos ofrecen dispositivos simples para control neumático a presiones más bajas y prácticamente sin partes móviles. Se han desarrollado posicionadores neumáticos con la capacidad de ubicar partes con una precisión de 1/1,000 pulgadas sin el uso de topes mecánicos, con la ayuda de sensores y controladores programables (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En el caso de los embotelladores de bebidas carbonatadas y cerveceros dependen del aire comprimido para un número de operaciones de embotellado, incluyendo tapado de botellas. La industria del cemento Pórtland es uno de los mayores consumidores de aire comprimido, y probablemente solamente algunas industrias la superan en diversidad de aplicaciones. La mayor parte del aire comprimido utilizado en una planta de cemento se utiliza en transporte. Todas menos una porción insignificante del cemento Pórtland fabricado es transportado desde molinos a los silos de almacenamiento, por medio de bombas de aire comprimido. Muchas fábricas también utilizan el método de

bombeo de aire comprimido para el transporte de cemento de los silos a los contenedores, para la carga y descarga de vehículos.

Y se podría mencionar las muchas aplicaciones que tiene el aire comprimido por ejemplo, en destilerías, clínicas dentales, fabricación de productos eléctricos, industrias alimenticias, farmacéuticas, mueblerías, hospitales, minería, industria del petróleo, barcos, compañías telefónicas, textilerías, parques de diversión, como podemos ver el aire comprimido es de vital importancia y muchos de los productos que hoy se tiene en los hogares fueron fabricados usando aire comprimido (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

El rango de presiones de trabajo va desde 40 psia (1.72 bar) hasta 60,040 psia (4,137 bar) presiones relativas. En casi todas las fábricas o plantas de producción el uso más frecuente es a presiones de 75 a 160 psia (4.14 a 10 bar), casi todos los equipos son diseñados para operar dentro de este rango (Severns, Degler, & Miles, 1996).

7.1.2. Termodinámica en la compresión de aire

La mayoría de los compresores se diseñan y analizan usando la ley de los gases perfectos y supone que tiene un calor específico constante. La ley de los gases perfectos es útil para hacer cálculos, (excepto para los gases que sean hidrocarburos), hasta presiones de 1,000 psi a temperaturas normales. La mayoría de gases y refrigerantes hidrocarburos se desvían bastante de la ley de los gases perfectos, aún a presiones medianas, en estos casos se debería usar las tablas de propiedades termodinámicas, gráficas de Mollier y gráficas de compresibilidad, pero muchos gases de importancia industrial no cuentan con

ellas, pero se puede utilizar una gráfica general de compresibilidad (Severns, Degler, & Miles, 1996).

Una introducción a los fundamentos de la termodinámica, que ayude a entender mejor el principio de funcionamiento de los equipos que constituyen un sistema de aire comprimido cualquiera.

El primero lo constituye la ecuación general de los gases (y el aire está constituido por una mezcla de gases, entre los que destaca el nitrógeno en un porcentaje del 78 % y el oxígeno en el 21 %), por lo que la siguiente formulación le es también de aplicación.

La ecuación que relaciona presión, volumen y temperatura de un gas ideal es.

$$P V = m R T$$

Donde

- P es la presión absoluta del gas (Pa).
- V es el volumen que ocupa (m^3).
- m es el número de moles (es el cociente entre masa del gas / peso molecular o atómico del gas)
- R es la constante universal de los gases ($8.314 J/mol \cdot K$)
- T la temperatura absoluta (K) (Severns, Degler, & Miles, 1996)

De la anterior expresión, se deduce que si se hace aumentar la presión de un gas en mayor proporción a la que disminuye su volumen, como ocurre en la

cámara de un compresor de aire, entonces la temperatura de ese gas aumenta. Por eso, a la salida de un compresor el aire está más caliente.

Según la expresión anterior en un proceso isotérmico ($T=cte.$) las relaciones entre presión y volumen deben cumplir siempre la siguiente expresión.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \text{ conocida también como Ley de Boyle}$$

Por otro lado, también se deduce que si se mantiene la presión constante (isobara) el volumen de un gas cambia en proporción directa a como lo hace su temperatura, es decir, que:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{Conocida como Ley de Charles}$$

Por último, otro aspecto que debe ser considerado en los sistemas de aire comprimido es la presencia de agua en el aire. En efecto, el aire exterior de la atmósfera puede ser considerado como una mezcla entre aire seco y vapor de agua. La cantidad o el porcentaje de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad relativa. Los extremos estarán en el aire seco (contenido cero de agua) y en el aire saturado (cantidad máxima de agua que puede contener ese aire)..

La capacidad del aire para contener agua depende de la temperatura, aumentando cuando esta aumenta, es decir, que un aire caliente puede contener más vapor de agua que un aire frío, pero a medida que este aire se enfríe su capacidad para retener la humedad se hace menor, por lo que empezará a condensar gotitas de agua conforme baje la temperatura del aire.

Precisamente, el punto de rocío (PR) es esa temperatura a la que se satura el aire, es decir, la temperatura a la que el vapor de agua presente alcanza su presión de saturación. Si sigue bajando la temperatura por debajo de la temperatura de rocío comenzará a condensar agua, dado que el aire no tiene capacidad de contener esa humedad (Severns, Degler, & Miles, 1996).

7.1.3. Unidades de medición

En el SI (sistema internacional) la unidad estándar para la presión de los compresores es el kPa (kilopascal). En Europa y Estados Unidos han acordado como condiciones estándar 1 bar (14.5 lb/plg²) (100 kPa) a 20 °C y 0% de humedad relativa. La unidad para medición de flujo en ISO es m³/s, pero aún se usa m³/h, m³/min y L/s, en EUA se usa el pie³/min (cfm) y pie³/h (cfh) (Severns, Degler, & Miles, 1996).

7.2. Compresores

El compresor es el elemento encargado de tomar el aire exterior que está a presión atmosférica (aprox. 1 bar) para elevarla según las necesidades de consumo o de uso a que se destine este aire comprimido (ej. para el accionamiento de utillajes, mecanismos, o bien de control o medida, accionando válvulas y otros dispositivos) (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Los compresores para aire también se emplean para gas, refrigeración, aire acondicionado, calefacción, transporte por tuberías, acopio de gas natural, craqueo catalítico, polimerización y en otros procesos químicos.

Muchos compresores de aire modernos se suministran integrados en una sola unidad, que incluye el compresor, motor primario y el resto de los

componentes y accesorios, montados en un solo bastidor y recubiertos para disminuir el ruido y mejorar su aspecto.

Según el principio de la termodinámica que se emplee, hay dos grandes familias de compresores de aire.

Compresores de desplazamiento positivo, donde el aire se confina en un volumen interior de la máquina que posteriormente se reduce de dimensión por el desplazamiento de alguna de sus paredes, con el consiguiente aumento de la presión del aire retenido en su interior. Este tipo de compresores ofrecen caudales de aire no demasiado altos, pero permiten obtener relaciones de presión más elevadas (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Compresores dinámicos o turbocompresores, en este caso, los responsables de elevar la presión del aire son unos álabes que giran a gran velocidad, y que transmiten esta velocidad al aire que toman del exterior. Posteriormente este aire pasa a otra cámara o difusor donde el aire baja bruscamente su velocidad, transformándose toda la energía cinética adquirida en presión estática. Este tipo de compresores son capaces de proporcionar mucho caudal de aire, aunque a presiones más moderadas que el tipo anterior (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

Clasificación de los compresores:

- De desplazamiento positivo
 - Reciprocantes: Simple efecto
 - Doble efecto

- Rotatorios: Tornillo Helicoidal
 - Anillo líquido
 - Paletas deslizantes

- De desplazamiento no positivo, o dinámicos
 - Compresores centrífugos de flujo radial
 - Compresores de flujo axial
 - Compresores de flujo mixto (Avallone & Baumeister, 1995)

7.2.1. Compresores de desplazamiento positivo

7.2.1.1. Compresores de pistón

El compresor de pistón es uno de los diseños más antiguos de compresores, pero sigue siendo en la actualidad el más versátil y eficaz. Este tipo de compresor funciona mediante el desplazamiento de un pistón por el interior de un cilindro accionado por una varilla de conexión o biela y un cigüeñal (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En los compresores de aire de pistón, el aire es comprimido en una cámara definida por la pared de un cilindro y el pistón. La posición del pistón, conectado a la biela, está controlada por el cigüeñal. Cuando el cigüeñal gira, el pistón se mueve hacia abajo, aumentando el tamaño de la cámara, por lo que a través de una válvula de aspiración llena de aire el interior de la cámara. Cuando el pistón alcanza su posición más baja en el cilindro, invierte su dirección y se mueve hacia arriba, reduciendo el tamaño de la cámara a la vez que aumenta la presión del aire en su interior. Cuando el pistón alcanza su posición máxima en el cilindro, el aire comprimido es descargado a través de la

válvula de descarga hacia el depósito de acumulación (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Si sólo se usa un lado del pistón para la compresión, entonces se trata de un compresor de simple efecto. Por otro lado, si se utilizan ambos lados del pistón, las partes superior e inferior, entonces se trata de un compresor de doble efecto. La versatilidad de los compresores de pistón es muy extensa. Permite comprimir tanto aire como gases, con muy pocas modificaciones. El compresor de pistón es el único diseño capaz de comprimir aire y gas a altas presiones.

Otra opción en los compresores de pistón es la de emplear más de un pistón (por ejemplo, dos pistones) por lo que la compresión se realiza en varias etapas alcanzando mayores niveles de compresión. Después de cada etapa de compresión el aire se enfría antes de pasar a la siguiente etapa de alta, con lo que se mejora la eficiencia del proceso (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En el caso de compresores de dos pistones, la configuración en "V" es la más habitual para el caso de compresores de pequeño tamaño, mientras que la configuración en "L" (un pistón en posición vertical y el otro en horizontal) es también un diseño muy utilizado. En este caso, el pistón vertical es el de baja presión y el horizontal el de alta. Por su diseño, los compresores de aire de pistón logran producir altas presiones en volúmenes relativamente pequeños, por lo que tienen mucha aplicación en actividades domésticas e industriales ligeras. (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Por último, están los compresores de diafragma mecánico. Este tipo de compresores se emplean para aplicaciones de pequeños caudales y bajas

presiones o también como bombas de vacío. En este caso, un cigüeñal comunica el movimiento alternativo a través de una biela al diafragma y por medio de válvulas de admisión trasladan el aire comprimido a un depósito. (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.2.2. Compresores de tornillo

El compresor de tornillo es un compresor de desplazamiento que se constituye de dos rotores en forma de tornillo paralelos y que giran en sentido contrario uno del otro, quedando todo el conjunto encerrado dentro de una carcasa.

Figura 1. **Diagrama de compresor de tornillo**



Fuente: (Cagi Compressed air & gas institute, 2012)

El incremento de presión en el aire se consigue gracias al movimiento rotatorio a contrasentido de los dos rotores que hace disminuir gradualmente el espacio encerrado que queda entre las hélices.

La relación de presión dependerá de la longitud y paso del vástago del tornillo, así como la forma dada al difusor donde se descarga el aire. Asimismo, la relación de presión máxima estará limitada por el incremento de temperatura que se origina con la compresión, de tal forma que, no afecte a la alineación de los rotores. Por ello, cuando se necesite de grandes relaciones de compresión se deberá utilizar varias etapas de compresión (en cada etapa, un compresor de tornillo), intercalando equipos de refrigeración del aire en cada etapa.

Los compresores de tornillo están ganando popularidad con respecto a los compresores de pistón alternativos, debido a su funcionamiento silencioso y a su suministro continuo, que se une a sus otras muchas ventajas, como puedan ser una mayor fiabilidad y eficacia (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.2.2.1. Compresores de paletas rotativas

El compresor de paletas rotativas, basado en una tecnología tradicional y experimentada, se mueve a una velocidad muy baja (1,450 rpm), lo que le otorga una gran fiabilidad. Son también muy silenciosos y proporcionan un caudal prácticamente constante.

Hay dos grupos de compresores de paletas rotativas, el primero lo forman los compresores de paleta en seco, los cuales van exentos de aceite, pero sólo pueden operar con presiones bajas de hasta 1,5 bar. El otro grupo, el mayoritario, lo forman los compresores rotativos de paletas lubricadas, y estos ya sí pueden alcanzar presiones finales mayores, de hasta 11 bar.

Los compresores rotativos de paleta tienen generalmente un rendimiento superior a los compresores de tornillo, generalmente con una diferencia en cuanto a eficiencia de un 25 % en favor del compresor de paletas. El principio

de funcionamiento es muy simple. El rotor, la única pieza en movimiento constante, dispone de una serie de ranuras con paletas deslizantes que se desplazan por su interior. Las paletas se realizan de una aleación especial de fundición, y van lubricadas en aceite como el resto de componentes, cuando son compresores lubricados (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

El rotor, que está montado con cierta excentricidad dentro de la carcasa cilíndrica o estator, al girar genera una fuerza centrífuga que desplaza a las paletas de las ranuras contra las paredes de la carcasa formándose células individuales de compresión. La rotación reduce el volumen de la célula, por lo que se consigue aumentar la presión del aire contenido.

El calor que genera la compresión se controla mediante la inyección de aceite a presión, necesario para la lubricación del rotor y las paletas. El aire a alta presión se descarga cuando las paletas en su rotación pasan por el puerto de salida. Junto al aire se arrastran restos de aceite procedentes de la lubricación que deben ser eliminados por el separador de aceite a situar aguas abajo (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.2.3. Compresores dinámicos o turbocompresores

La otra gran familia de compresores la constituyen los compresores dinámicos o turbocompresores. Los compresores dinámicos a su vez se dividen en dos grandes grupos, según la dirección de salida del flujo de aire: radiales (centrífugos) o de flujo axial. Los compresores dinámicos permiten ofrecer un flujo continuo y suelen ser compresores muy eficientes si trabajan dentro de sus condiciones de diseño, dado que al tener pocas piezas en movimiento, se reduce mucho las posibles pérdidas debido a la fricción y al calentamiento de las mismas. No obstante su rendimiento depende mucho de las condiciones

exteriores, así un cambio en la temperatura de entrada del aire respecto a sus condiciones de diseño que indique la hoja de especificaciones del compresor hacen variar significativamente su eficiencia final (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.2.3.1. Compresores centrífugos

Son compresores dinámicos donde la descarga final del aire se realiza en sentido radial. En cada etapa de compresión en este tipo de compresores el flujo de aire entra por el centro de un rodete dotado de álabes. El rodete va montado sobre un eje que gira a gran velocidad, y debido a la fuerza centrífuga impulsa al aire hacia la periferia del rodete. Posteriormente, este aire que sale radial y a gran velocidad va a parar a la carcasa o difusor en forma de espiral donde toda la energía cinética del aire se transforma en energía potencial en forma de presión (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Generalmente, los compresores centrífugos constan de 2 o 3 etapas de compresión, con refrigeración intermedia. En este tipo de máquina, el régimen de giro que alcanza el eje es muy elevado (entre 15,000-100,000 rpm), por lo que los cojinetes empleados serán de altas prestaciones, generalmente cojinetes de fricción lisos y lámina de aceite para lubricación.

No obstante, estos compresores trabajan exentos de aceite, dado que la lubricación se limita a los cojinetes que se sitúan en los extremos del eje fuera del contacto con el flujo de aire (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

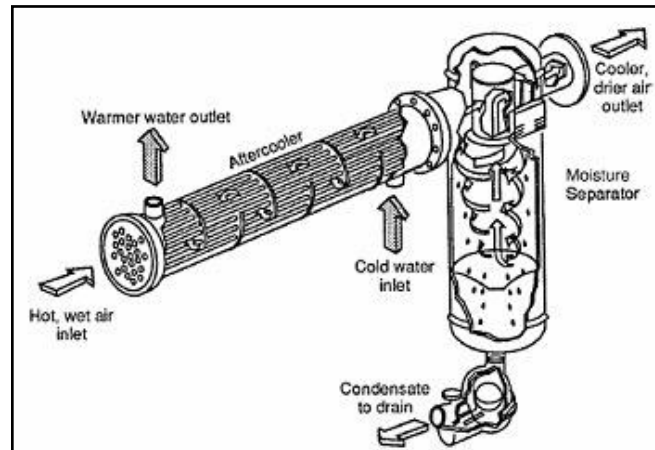
7.3. Componentes de un sistema de aire comprimido Industrial

7.3.1. Equipo refrigerador posterior

El flujo de aire, una vez sale del compresor, además de salir a mayor presión, también sale a mayor temperatura (oscila, según el grado de compresión entre 70 °C y los 200 °C). El aire a mayor temperatura también aumenta su capacidad de contener agua, pero conforme se vaya enfriando todo esta agua irá condensando y si no se ha extraído previamente terminará en el interior de la instalación y llegará hasta los puntos de consumo, con el riesgo que ello conlleva, no sólo en cuanto a durabilidad de la instalación y sus equipos (riesgo de oxidación), sino por el peligro de formación de plagas de microorganismos y el consiguiente riesgo de enfermedades (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Por ello, para evitar posibles condensaciones se coloca, nada más salir del compresor, un enfriador (aftercooler). El aftercooler no es más que un intercambiador de calor, que puede funcionar bien con agua o bien con aire como fluido caloportador. En la figura siguiente se muestra un esquema del dispositivo.

Figura 2. **Aftercooler con deshumificador incorporado**



Fuente: (Cagi Compressed air & gas institute, 2012)

Justo detrás del enfriador, se coloca un deshumificador que recoja lo antes posible el condensado producido. Este sistema ofrece una eficiencia entre el 80-90 %, por lo que habrá que tener en cuenta la presencia todavía de agua en la instalación. Así, en el siguiente equipo, que suele ser el depósito de acumulación, habrá que dotarle de una válvula en su fondo para que siga drenando el agua que no se ha eliminado con el deshumificador (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.3.2. **Depósito de acumulación**

En todo sistema de aire comprimido es habitual la colocación de un depósito de acumulación de aire que alimente a las unidades de consumo. En una instalación con un compresor tipo todo / nada donde no exista un sistema de regulación de su velocidad que pueda acomodar la producción de aire a las necesidades de consumo, el depósito de acumulación funciona como un depósito pulmón, que permite reducir el número de arranques del compresor

para hacer frente a la demanda de aire comprimido cada vez que se produzca. Generalmente es recomendable que un compresor tenga un régimen de arranques y paradas que se sitúe entre las 5-10 veces / hora (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

El volumen de acumulación del depósito vendrá determinado por la capacidad del compresor, el sistema de regulación que se disponga y del modelo de consumo que va a seguir la instalación, es decir, si se tiene un consumo regular o por el contrario va a ser irregular con largos periodos de consumo moderado y periodos cortos con picos de elevado consumo. En caso de existir varios compresores que den servicio a la misma instalación, será las características del compresor de mayor capacidad el que condicione las características del depósito (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En la siguiente figura, se muestra un depósito vertical dotado de las tubuladuras de entrada y salida de aire, boca de inspección, manómetro de medida de la presión interior, válvula de seguridad y válvula de desagüe o grifo de purga en la parte inferior del depósito.

Figura 3. **Depósito de acumulación vertical**



Fuente: (Cagi Compressed air & gas institute, 2012)

La válvula de seguridad estará regulada a no más de un 10 % por encima de la presión de trabajo. Además deberá ser capaz de descargar el volumen total del aire comprimido que haya sido generado por el compresor. Deberá contar además con un dispositivo de accionamiento manual para probar periódicamente su funcionamiento (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

Las tuberías para el control (regulación) deberán estar conectadas al depósito en un punto donde el aire sea lo más seco posible (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

El filtro con válvula de purga permitirá drenar el agua y aceite acumulado en el fondo del depósito.

Para el cálculo del volumen (V) del depósito de acumulación es habitual el empleo de la siguiente expresión que relaciona las condiciones de funcionamiento del compresor con el consumo de aire de la instalación.

$$T = \frac{V * (P_1 - P_2)}{C * P_{atm}}$$

Donde:

- T es el tiempo en minutos que transcurre entre arranques consecutivos del compresor, es decir, el tiempo que transcurre entre pasar de la presión máxima en el depósito (P_1) a la presión mínima (P_2) de tarado que produce el arranque del compresor. El número de arranques / hora que resulta óptimo para cada compresor es un dato que puede ser consultado en su hoja de especificaciones.
- $P_1 - P_2$ es la diferencia de presiones máxima y mínima alcanzada en el interior del depósito (psig).
- C es el consumo de aire en condiciones normales (CN) de la instalación (m^3 /minuto).
- P_{atm} es la presión atmosférica (Cagi Compressed air & gas institute, 2012)

Decir que el depósito de acumulación cumple una misión amortiguador, dado que aísla el resto de la instalación de las pulsaciones en el caudal del aire producida a la salida del compresor, sobre todo de los compresores alternativos o de pistón, ofreciendo un caudal regular y uniforme, sin fluctuaciones (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.3.3. Filtros

Como ya se ha dicho, el aire es una mezcla incolora, inodora e insípida de muchos gases, principalmente nitrógeno y oxígeno. Además, el aire se contamina de forma natural con partículas sólidas, como polvo, arena, hollín y

cristales de sal, dependiendo del entorno y la altitud donde se encuentre la instalación. El vapor de agua es otro ingrediente natural que se puede encontrar en cantidades variables en el aire, además de restos de aceites que provengan de la lubricación del compresor. Resulta muy conveniente situar los filtros previos a los puntos de consumo, de manera que adecuen perfectamente su sistema de filtrado a los valores admisibles en cuanto contenido de aceite y de partículas, así como de vapor de agua antes que el aire alcance el punto final de consumo (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.3.4. Secado del aire comprimido

El contenido de humedad del aire o de un gas comprimido se expresa normalmente por su punto de rocío, PR, en °C, es la temperatura a que tendría que enfriarse el aire para que el vapor de agua contenido en él condense.

Los fabricantes de secadores para aire comprimido, para especificar la eficacia de un secador, usan la terminología del PR alcanzado con él para describir la sequedad del aire. Pueden dar el punto de rocío a la presión atmosférica (PR), o sea 760 mm Hg, o bien el referido a la presión de trabajo, denominado punto de rocío a presión (PRP). Este último es más alto, es decir $PRP > PR$, y es el que realmente deberá tenerse en cuenta, dado que el aire comprimido se emplea a presión, y por lo tanto, a la presión de trabajo es cuando pueden producirse condensaciones perjudiciales en las conducciones y en los sitios de consumo (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

En muchas aplicaciones donde se requiere aire de gran calidad y completamente seco, se debe someter al aire a un nuevo proceso de secado que elimine completamente el contenido de agua.

Existen varias tipologías de secadores, cada una con una complejidad y costo de instalación distinta. La variable que va a condicionar el coste y complejidad del secador necesario va a ser el punto de rocío a presión que tenga el aire a tratar. A menor punto de rocío mayor complejidad del secador.

Una manera de secar el aire básicamente consiste en comprimir el aire a mayor presión de la necesaria, con lo que se consigue aumentar la concentración de agua. Posteriormente, se enfría la masa de aire, condensando el agua contenida. Ahora sólo queda expandir el aire hasta la presión requerida, con lo que se consigue una calidad de aire excelente con un punto de rocío a presión más bajo (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.3.5. Separador de aceite / agua

La fracción de condensado que decante en el fondo de los depósitos de acumulación, así como la fracción separada en los filtros separadores de agua, resulta ser un efluente acuoso con contenidos en aceite, sobre todo si se utilizan compresores lubricados con aceite.

La reglamentación vigente en la mayoría de los países impide el vertido en la red pública de saneamiento de agua con contenidos en aceite, por lo que previo a su vertido, habrá que someter al agua recogida a un proceso de separación, que permita recuperar el contenido de aceite y almacenarlo de forma independiente, y poder así verter el agua limpia resultante a la red de saneamiento. El aceite separado será retirado por un gestor autorizado para el tratamiento de este tipo de residuos (Cagi Compressed air & gas institute, 2012).

7.4. Diseño de la instalación

7.4.1. Generalidades

Para realizar un buen diseño de un sistema de aire comprimido, éste debe cumplir con tres objetivos básicos: que la pérdida de carga sea mínima, disminuir las pérdidas o fugas en el sistema, y realizar un diseño tal que se facilite el drenaje del agua que se condense en el interior del circuito.

La red de distribución de aire comprimido deberá dimensionarse de tal forma que la caída de presión máxima entre la salida del compresor y el punto de consumo más lejano en el anillo distribuidor sea como máximo de 0.1 bar. A esta caída de presión habría que añadirle las pérdidas finales originadas en la manguera flexible de conexión y otros conectores con el instrumento o utensilio que constituye el punto de consumo.

En general en un sistema de distribución de aire comprimido se pueden distinguir distintos tipos de tuberías según su función.

- Tuberías o ramales principales que provienen directamente de la sala de compresores.
- Tuberías de distribución, que parten del ramal principal y se distribuyen por los locales de uso.
- Tuberías de servicios, que son las derivaciones de la tubería de distribución hasta los accesorios de aire comprimido o puntos de consumo finales.

La mejor forma de implantar la línea de distribución es formando un anillo cerrado alrededor de la zona de consumo de aire, del que cuelgan los ramales

hasta los puntos de consumo final. Con ello se consigue una alimentación uniforme dado que cada punto recibe el aire desde dos direcciones, aunque los consumos sean intermitentes (Campos Avella, 2000).

Por último, decir que en todo diseño de un sistema de aire comprimido se recomienda seguir la siguiente secuencia lógica de etapas:

- Identificar los accesorios, herramientas y equipos consumidores de aire comprimido, señalando su localización en planta y determinando las condiciones de su consumo, tales como: caudal de aire y presión de suministro o de trabajo del equipo, máximo nivel de humedad admitido en el aire, de partículas y de contenido de aceite.
- Establecer el porcentaje de tiempo de funcionamiento de cada consumidor y el número de consumidores que pueden trabajar de forma simultánea en cada línea de distribución y en la línea principal.
- Estimar las posibles pérdidas por fugas, incorporándolo en el cálculo.
- Realizar el cálculo de la caída de presión máxima para cada punto final de consumo. El mayor valor obtenido será el que condicionará las prestaciones del compresor.
- Selección de los restantes elementos del sistema (compresor, depósito, equipos de tratamiento, etc.) y diseño final del piping de la red (Campos Avella, 2000).

7.4.2. Estimación de consumos

En general, el consumo total de aire comprimido es aquel que resulta de sumar el consumo de todos los equipos neumáticos conectados en la planta, al trabajar a pleno rendimiento. Este es un dato básico que permitirá la elección del tipo y dimensión del compresor.

A este valor hay que sumarle el obtenido por la estimación de las posibles fugas que en un futuro se originen en la instalación. Como nota extraída de la experiencia, decir que instalaciones bien conservadas presentan normalmente fugas que rondan entre el 2 y el 5 %. Instalaciones con varios años de servicio pueden llegar a tener fugas del orden del 10 %. Si además, las condiciones de mantenimiento no son del todo correctas, éstas pueden llegar a alcanzar valores del 25 %.

Por otro lado, es habitual colocar en los puntos finales de consumo elementos como filtros y reguladores de presión que adecuen las características del aire a las especificaciones del equipo (Campos Avella, 2000).

7.4.3. Cálculo de las pérdidas de carga

Toda la presión a la salida del compresor no se puede utilizar, dado que debido al rozamiento del aire con las paredes de la tubería, por donde circula hasta llegar a los puntos de consumo, más los efectos de estrangulamientos que se originan en las válvulas de paso, los cambios de dirección en el flujo en los codos, todo ello repercute en pérdidas a través de un aumento en la temperatura del aire que se transforma finalmente en una pérdida de presión estática en el flujo, (Campos Avella, 2000).

Como ya se apuntó anteriormente, toda red de distribución de aire comprimido debe dimensionarse de tal forma que, la caída de presión máxima entre la salida del compresor y el punto de consumo más lejano en el anillo distribuidor, sea como máximo de 0.1 bar. En la siguiente tabla se indican los valores recomendados de pérdida de carga en cada zona de una instalación fija de aire comprimido.

Tabla I. **Distribución caídas de presión**

Caída de presión en ramal principal	0.02 bar
Caída de presión en tuberías de distribución	0.05 bar
Caída de presión en tuberías de servicios	0.03 bar
Caída de presión total en instalación de tuberías desde compresor hasta punto más lejano del anillo distribuidor	0.10 bar

Fuente: (Campos Avella, 2000).

Existe una formulación matemática, la ecuación de Darcy-Weisbach, que permite calcular la pérdida de carga en un tramo longitud de tubería mediante la siguiente expresión.

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde :

- Δp es la pérdida de carga medida según la altura manométrica (m.c.a.)
- L es la longitud de tramo de la tubería (m)

- D es el diámetro interior de la tubería (m)
- v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)
- g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach

De la anterior expresión todos los parámetros son conocidos salvo el factor de fricción (f). En efecto, la velocidad del aire por la tubería (v) está relacionada con el caudal o flujo de aire (Q), que es un dato conocido proveniente del consumo necesario de cada punto de suministro.

En efecto

$$Q = v \cdot A$$

Donde

- Q es el caudal volumétrico o flujo de aire (m³/s)
- v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)
- A es el área de la sección interna de la tubería ($\pi \cdot D^2 / 4$) (m²)

En las instalaciones de aire comprimido la velocidad máxima recomendada para la circulación del aire por las tuberías está entre los 5-10 m/s, por lo que conocido el caudal (Q) necesario para el consumo y tomando una velocidad de circulación en ese intervalo, se obtiene de la expresión anterior el diámetro interior de la tubería (D). Por lo tanto, es el factor de fricción (f), la gran incógnita a calcular (Campos Avella, 2000).

El factor de fricción (f), es un parámetro adimensional que depende del número de Reynolds (R_e) del fluido (en este caso, del aire) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r).

$$f = f(R_e, \epsilon_r)$$

Donde, el número de Reynolds (R_e) viene expresado por la siguiente formulación.

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{M}$$

Siendo

- ρ densidad del fluido, en este caso del aire ($\rho_{aire} = 1.18 \text{ kg/m}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$)
- v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)
- D es el diámetro interior de la tubería (m)
- μ es la viscosidad dinámica del fluido, el aire ($\mu_{aire} = 1.76 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$)

Por otro lado, la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r) viene dada en función de la rugosidad absoluta (K) del material del que está fabricada la tubería y de su diámetro interior (D) de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\epsilon_r = \frac{K}{D}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

Tabla II. **Rugosidad en los materiales**

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES				
Material	K (mm)		Material	K (mm)
Plástico (PE, PVC)	0.0015		Fundición asfaltada	0.06-0.18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0.01		Fundición	0.12-0.60
Tubos estirados de acero	0.0024		Acero comercial y soldado	0.03-0.09
Tubos de latón o cobre	0.0015		Hierro forjado	0.03-0.09
Fundición revestida de cemento	0.0024		Hierro galvanizado	0.06-0.24
Fundición con revestimiento bituminoso	0.0024		Madera	0.18-0.90
Fundición centrifugada	0.003		Hormigón	0.3-3.0

Fuente: (Campos Avella, 2000).

Por otro lado, en el transporte de fluidos por el interior de tuberías, y el aire es un fluido, existen dos regímenes: laminar y turbulento. Para cada fluido, y para una sección de tubería, a una temperatura determinada, existe una velocidad crítica (v_c) por debajo de la cual el régimen es laminar. Este valor crítico que marca la transición entre los dos regímenes, el laminar y el turbulento, se corresponde con un $R_e = 2,300$, aunque en la práctica, entre

2,000 y 4,000 la situación es bastante imprecisa. Por lo tanto, en función del valor del número de Reynolds (R_e) se tiene que:

- $R_e < 2,000$: Régimen laminar
- $2,000 < R_e < 4,000$: Zona crítica o de transición
- $R_e > 4,000$: Régimen turbulento

Este concepto es importante conocerlo, porque la expresión para calcular el factor de fricción (f) es distinta según si el régimen es laminar o turbulento.

Así se tiene que:

- Régimen laminar

En este caso el factor de fricción (f) depende únicamente del número de Reynolds a través de la ecuación de Poiseuille: $f = 64 / Re$

Expresión que resulta sencilla de aplicar para calcular el factor de fricción (f) en función del Reynolds (R_e). (Avallone & Baumeister, 1995).

- Régimen turbulento

Para el régimen turbulento este cálculo ya no es tan inmediato dado que el factor de fricción (f) depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería. En este caso existen diversas formulaciones que pueden ser utilizadas para el cálculo del factor de fricción: como la ecuación de Colebrook-White, y otras como la de Barr, la de Miller o la de Haaland (Campos Avella, 2000).

Afortunadamente, además de estas expresiones existen representaciones gráficas y ábacos empíricos que nos permiten calcular cómodamente el factor de fricción (f). Uno de ellos es el Diagrama de Moody que es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de fricción (f) en función del número de Reynolds (R_e) y de la rugosidad relativa de la tubería (K/D).

No obstante, existen diagramas empíricos, que suministran la mayoría de casas comerciales, y que permiten obtener ya directamente la caída de presión en tramos rectos de tuberías en función de la longitud de tubería considerada, su diámetro interior, el caudal de aire que circula y su presión (Campos Avella, 2000).

7.4.4. Dimensionado del compresor y depósitos

Para la selección del tipo de compresor más idóneo a la instalación que se proyecte es necesario de disponer de dos datos básicos como punto de partida a la hora de iniciar su selección.

- Consumo o caudal de aire
- Presión máxima de trabajo

Se suele emplear ábacos o tablas que recomiendan la tipología de compresor más idónea según el rango de trabajo donde se encuentre la instalación a proyectar.

No obstante, el resultado anterior debe suponer el punto de partida, dado que no sólo el consumo o el rango de presiones que debe dar el compresor va a condicionar su elección, sino que hay otros factores que dependiendo del lugar donde se instale (zona residencial, zona industrial...) o el tipo de

aplicación (automoción, instalación fija...) decantará la elección en uno u otro tipo que por su construcción mejor se adapte al entorno.

Así, a la hora de seleccionar el tipo de compresor habrá que tener en cuenta los siguientes condicionantes y comprobar que están incluidos en la hoja de especificaciones técnicas del compresor que se seleccione.

- Altitud, dado que algunos tipos de compresores los cambios de altura o de temperatura del aire de aspiración afectan significativamente a su rendimiento.
- Factores medioambientales, tales como si es aplicable alguna limitación de emisión sonora.
- Determinar el rango de funcionamiento, frecuencia de arranques/paradas o modalidad de trabajo en continuo (Campos Avella, 2000).

7.5. Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido

El aire comprimido es utilizado ampliamente en la industria, desde los pequeños talleres de maquinado hasta los grandes complejos industriales. En muchos casos, el aire comprimido es tan vital que la planta no puede operar sin él. Los sistemas de aire comprimido pueden variar ampliamente en tamaño, desde unidades de menos de 5 hp, hasta sistemas de más de 50.000 hp.

En muchas plantas industriales los compresores de aire son los mayores consumidores de electricidad, y por tanto la ineficiencia en el sistema de aire comprimido resulta muy costosa. Sin embargo, el personal que utiliza el aire comprimido tiende a pensar que el mismo tiene poco valor; y así, por pensar que se trata de simple aire, por la prácticamente nula peligrosidad de un escape

o fuga, es muy frecuente que no se le presta atención a su ahorro y uso adecuado.

El mejoramiento de la eficiencia energética en estos sistemas puede permitir la reducción del 20 al 50 % del consumo de electricidad de los mismos, lo cual puede significar miles o cientos de miles de dólares de ahorros potenciales anuales. Un sistema de aire comprimido bien operado ahorra energía, reduce el mantenimiento, disminuye las interrupciones productivas, incrementa la productividad y mejora la calidad.

En los sistemas de aire comprimido se puede diferenciar el lado del suministro, que incluye a los compresores y los equipos de tratamiento del aire y el lado de la demanda, que está compuesto por el sistema de almacenamiento y distribución y los equipos de uso final del aire comprimido. Para lograr que un sistema de aire comprimido garantice el suministro estable de aire seco, limpio, a las presiones requeridas y de una forma segura y económica, se requieren acciones tanto del lado del suministro, como del lado de la demanda, así como en sus interacciones (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

7.5.1. Uso apropiado del aire comprimido

El aire comprimido es probablemente el portador energético secundario de más costo en una planta; sin embargo, por ser limpio, por estar siempre disponible y tener muchas facilidades para su empleo, se utiliza en muchos casos para aplicaciones en las que otros portadores energéticos pueden resultar más económicos.

Como regla general, el aire comprimido debe utilizarse solo si se incrementa la seguridad de operación, si se logra un aumento significativo de la productividad, o una reducción de la mano de obra, ya que la eficiencia energética global típica de un sistema de aire comprimido es solo de un 10 %. En los casos en que se utilice el aire comprimido para una aplicación dada, la cantidad de aire debe ser la mínima requerida, a la presión más baja posible y durante el menor tiempo.

Ejemplos de aplicaciones en las que pueden resultar más económicos otros portadores son:

- Utilizar aire acondicionado o ventiladores para enfriar gabinetes eléctricos en lugar de tubos vortex con aire comprimido.
- Aplicar bombas de vacío en lugar de sistemas Venturi con aire comprimido a alta presión.
- Usar sopladores en lugar de aire comprimido para soplar, enfriar, agitar, mezclar o inflar empaques.
- Utilizar cepillos, aspiradoras, sopladores en vez de aire comprimido para limpiar partes o remover residuos.
- Emplear aire a baja presión para lanzas de aire, agitación, etc. En lugar de aire comprimido a alta presión.
- Utilizar motores eléctricos eficientes para herramientas y actuadores en los casos en que no sean imprescindibles algunas características específicas de los equipos neumáticos (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

7.5.2. Reducción de las fugas

Las fugas pueden representar una gran pérdida de energía en los sistemas de aire comprimido, llegando a perderse por este concepto hasta 30 %, y en casos extremos hasta el 50%, de la producción de aire. Se considera que una planta con un buen mantenimiento y un adecuado programa de control de fugas las pérdidas por fugas, las mismas deben estar entre el 5 y el 10 % de la producción de los compresores.

Las fugas, además de significar un consumo de potencia desperdiciado, pueden provocar caídas de presión, afectando el funcionamiento de los equipos y la productividad, hacen que los ciclos de trabajo de los compresores sean más cortos, que se incremente su tiempo de operación y en consecuencia su desgaste y gasto de mantenimiento, y pueden conllevar incluso a la necesidad de instalar capacidad de compresión adicional innecesaria.

En la tabla siguiente se ofrece una idea de lo que puede representar una fuga en costo anual, para un sistema convencional que opere de forma continua, para un costo de la electricidad de 0.05 USD/kW y a diferentes presiones de descarga.

Tabla III. **Tabla III. Costos por fugas**

Diámetro de fuga (mm)	Costo, US\$/año (6bar)	Costo, US\$/año (12bar)
1	144	480
3	1,488	6,096
5	3,984	16,176
10	15,840	63,360

Fuente: (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

Aunque las fugas se pueden presentar en cualquier parte del sistema, los puntos de fuga más frecuentes son:

Acoplamientos, mangueras y accesorios, reguladores de presión, trampas de condensado, uniones de tuberías (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

7.5.3. Estimación del porcentaje de fugas

Para los compresores con control de dos posiciones se puede emplear un método muy sencillo para estimar el porcentaje de fugas en el sistema. El método consiste en estimar inicialmente la producción total de aire comprimido

con la planta funcionando a plena carga a partir de los tiempos de trabajo y parada del compresor, y luego de igual forma estimar las fugas con todos los equipos de uso parados. De esta forma se obtiene:

$$Fugas(\%) = \frac{T_{pon} / (T_{pon} + T_{poff})}{T_{on} / (T_{on} + T_{off})} * 100$$

Dónde: Tpon, Tpoff: Tiempos de trabajo y parada del compresor sin consumo en equipos de uso final, minutos. Ton, Toff: Tiempos de trabajo y parada del compresor con equipos de uso final funcionando a plena carga, minutos.

Para sistemas con otros sistemas de control las fugas pueden ser estimadas a partir del volumen total del sistema y del tiempo en que demora en caer la presión un intervalo dado sin trabajar el compresor y sin consumo en los equipos de uso final. Para realizar esta prueba se requiere primeramente realizar un estimado del volumen total del sistema, incluyendo tuberías principales, secundarias, tanques recibidores, etc. Luego se arranca el compresor con todos los equipos de uso final parados, y se lleva el sistema a su presión normal de operación (P1), y a continuación se detiene el compresor. Por último, se mide el tiempo t en que el sistema demora en reducir su presión hasta un valor P2, cercano a la mitad de la presión normal de trabajo. A partir de estas mediciones las fugas se pueden calcular por la expresión:

$$Fugas = (V * (P1-P2)/(T * Patm)) * 1.25 \quad (ft^3 / min \text{ de aire seco})$$

Donde

- V: volumen total del sistema, ft³

- P_1 : – presión inicial, psig.
- P_2 : presión final, psig.
- T: Tiempo que demoró la presión en descender de P_1 a P_2 , min.
 P_{atm} : Presión atmosférica estándar, lb/in²; $P_{atm} = 14.7$ lb/in².
- 1.25: Factor que se incluye para corregir las fugas a la presión normal de operación, tomando en consideración que estas disminuyen al descender la presión (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

7.5.4. Detección de fugas

El mejor método para localizar los puntos de fugas consiste en el empleo de un detector acústico ultrasónico, el cual identifica el sonido de alta frecuencia asociado a las fugas de aire. Otro método, que es más engorroso, consiste en la aplicación de solución jabonosa en las áreas bajo sospecha.

Un buen programa de prevención de fugas incluye la evaluación, identificación, reparación y verificación, logrando involucrar a todo el personal en el mismo (Kaeser Kompressoren SE, 2016).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Compresión del aire
 - 1.1.1. Aplicaciones del aire comprimido
 - 1.1.2. Termodinámica en la compresión del aire
 - 1.1.3. Unidades de medición
- 1.2. Compresores de desplazamiento positivo
 - 1.2.1. Compresores de pistón
 - 1.2.2. Compresores de tornillo
 - 1.2.3. Compresores de paletas rotativas
 - 1.2.4. Compresores dinámicos o turbocompresores
 - 1.2.5. Compresores centrífugos
- 1.3. Componentes de un sistema de aire comprimido industrial
 - 1.3.1. Equipo refrigerador posterior
 - 1.3.2. Depósito de acumulación
 - 1.3.3. Filtros
 - 1.3.4. Secado del aire comprimido

- 1.3.5. Separador de aceite / agua
- 1.4. Diseño de la instalación
 - 1.4.1. Generalidades
 - 1.4.2. Estimación de consumos
 - 1.4.3. Cálculo de las pérdidas de carga
 - 1.4.4. Dimensionado del compresor y depósito
- 1.5. Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido
 - 1.5.1. Uso apropiado del aire comprimido
 - 1.5.2. Reducción de las fugas
 - 1.5.3. Estimación de porcentaje de fugas
 - 1.5.4. Detección de fugas

2. DATOS Y ESTUDIO DE CASOS

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo, pues busca especificar las propiedades y características de un proceso que se someta a un análisis, en este caso, de causa y efecto con las fugas de aire y el ahorro energético, cuyos resultados se pueden generalizar para aplicaciones similares.

9.2. Fases de estudio

9.2.1. Fase 1: Exploración bibliográfica

En esta fase se explorarán bibliografías y la literatura relacionada con el tema objeto de estudio y los elementos que la componen.

Con la información obtenida se adaptará para explicar el comportamiento de un sistema de aire comprimido, los componentes que la conforman y su balance energético que le corresponde, así como las condiciones de trabajo necesarias para una buena operación y definición de sus variables.

9.2.2. Fase 2: Recolección de datos

Se debe conocer la frecuencia de arranque de los compresores, así como su consumo energético en kWh, para esto solo se tomarán dos horas de referencia, la cual servirá como muestra, pues la planta trabaja de continuo las

24 horas y este tamaño de muestra es representativo para el total de horas trabajadas por los compresores.

Tabla IV. **Reconocimiento de trabajo actual de compresores**

	Arranques/hora	Tiempo encendido	Consumo Kw/H
Compresor 1			
Compresor 2			
Compresor 3			
Compresor 4			
Total			

Fuente: elaboración propia.

Debido a los objetivos planteados es necesario la obtención del total de datos en este caso la detección de fugas, o sea el universo de fugas de aire.

La planta cuenta con dos líneas de producción cada una con sus propias instalaciones de distribución de aire comprimido, para realizar una ordenada tabulación y localización de fugas se utilizará un plano de distribución de tubería que llega a cada máquina o equipo, las líneas deberán estar presurizadas al momento de realizar dicha medición, se explorará en tuberías, válvulas, cilindros y otros accesorios, tabulando y haciendo un mapeo de las fugas encontradas, la tabla V se usará para compilar datos.

Se utilizará un equipo de detección de fugas de aire comprimido, gas, vapor, vacío a distancia de varios metros. Los gases escapan por las tuberías,

juntas, roscas, corrosiones y otros. La velocidad de escape genera sonidos ultrasónicos. La marca del equipo es CS Instruments, de origen alemán, es capaz de captar estos sonidos que no son audibles al oído humano y los transforma para que puedan ser escuchados en los audífonos que son parte del equipo y filtra además otros sonidos del ambiente.

El detector de fugas denominado LD 400 cuenta con una pantalla que registra los decibeles a los cuales está captando la fuga del gas, tiene un apuntador laser integrado para tener mayor exactitud de la localización de la fuga.

Figura 4. **Detector de fugas ultrasónico**



Fuente: (CS Instruments, 2016).

Tabla V. Tabulador de detección de fugas

Equipo	Cantidad fugas	Medida ultrasonido	Total
Anillo uno			
Salida horno			
Moldes			
Entrada enfriador			
Salida enfriador			
Final línea (apilador)			
Entrada decorado			
Salida decorado			
Total			

Fuente: elaboración propia.

Se hará investigaciones del factor de potencia que maneja la empresa, los registros históricos, con el fin de recomendar una posible reparación o eliminación de las fugas y como estas mejorarían el factor de potencia.

Definición de variables en fase 2

- Potencia: en kilowatt por hora, cantidad de energía consumida por un equipo por unidad de tiempo.

- Caudal: m^3/minuto , corresponde a un flujo de aire en volumen por unidad de tiempo
- Presión: en Pascal/m^2 , es fuerza ejercida en un área
- Ultrasonido: en decibeles, ondas mecánicas no ionizantes, cuya frecuencia está por arriba del umbral de la audición humana
- Factor de potencia: es una variable o indicador cuantitativo que determina el correcto aprovechamiento de la energía eléctrica
- Combustión: Reacción química o rápida oxidación del combustible, en el cual se desprende una gran cantidad de energía en forma de luz o calor
- Consumo energético: es la cantidad de energía requerida para realizar un trabajo por unidad de tiempo
- Decibel: es la unidad de medida de la intensidad del sonido

9.2.3. Fase 3: Análisis de datos

Debido a la experiencia de los fabricantes de este tipo de equipo de detección y estudios previos ya realizados se considera que cada fuga deja escapar un caudal de aire igual al que se escapa de un agujero de 1mm de diámetro, es aproximadamente 1,2 l/s a una presión de 6 bar.

Para conocer un estimado del total de pérdidas sumaremos la cantidad total de fugas detectadas con el equipo de ultrasonido y se multiplicara por el caudal mencionado de un agujero de 1/16". Este estimado total al multiplicarlo por el total de horas trabajadas y por días al año, se podrá conocer un aproximado del volumen total en un año que se está perdiendo de aire comprimido. Parámetro que permitirá saber qué cantidad de energía en kilowatt hora fueron necesarios para producirlos y más interesante aún el costo o pérdida económica que este significó para cubrir ese consumo de energía en un año, por el desperdicio del aire.

9.2.4. Fase 4: Discusión de resultados

Del análisis de datos se puede dividir los resultados en dos partes:

9.2.4.1. Discusión económica

En este caso esta es posiblemente la parte que mayor provecho tiene para para este tipo de estudio, pues al hacer un presupuesto para cubrir las reparaciones que requiera la eliminación o corrección de fugas, será sin duda, menor que el costo que actualmente se tiene por pago de energía eléctrica que consumen los compresores para producir el aire desperdiciado en fugas en un año.

También haciendo las reparaciones sugeridas significará menos horas de trabajo para los compresores, dando así un aumento en la vida útil de los mismos, lo que también significa un ahorro para la empresa por menor depreciación de los equipos.

9.2.4.2. Discusión ambiental

Esta cantidad de kilowatt - hora utilizados para la producción del total de aire comprimido perdido en un año corresponde a X cantidad de carbón que utilizaría una central termoeléctrica para producirlos y se dejarían de emitir X toneladas de CO₂ que emitiría este carbón por la combustión.

Tabla VI. **Pérdida anual por fugas**

Agujero \varnothing (mm)	Pérdidas aire a 6 bar		Pérdida de energía a 6bar (kWh)	Pérdida de energía a 12bar (kWh)
	(l/s)	a 12 bar (l/s)		
1	1,2	1,8	0,3	1,0
3	11,1	20,8	3,1	12,7
5	30,9	58,5	8,3	33,7
10	123,8	235,2	33,0	132,0

Fuente: (CS Instruments, 2016)

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

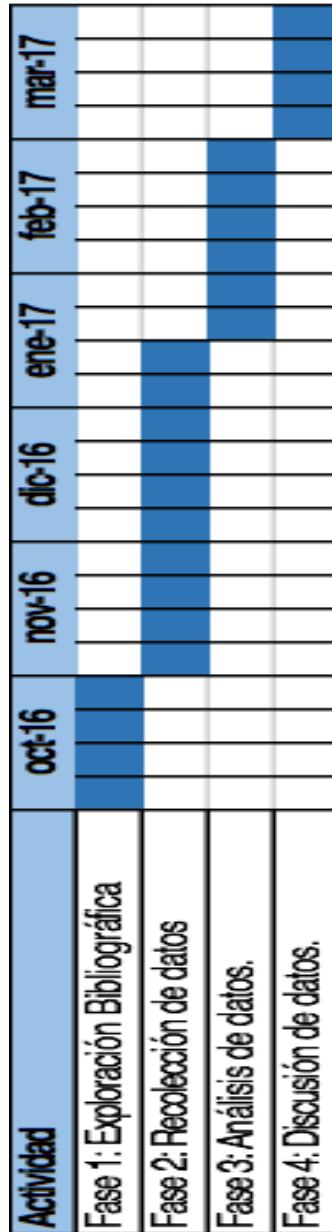
La información de los estudios previos y datos recabados serán analizadas por medio de las herramientas y técnicas de análisis siguientes:

- Tabla frecuencia de arranque de los compresores
- Tablas de tiempo de duración de encendido de compresores
- Tablas de consumo energético de los compresores en KW/h
- Gráficas circular y de columnas para representar la frecuencia de arranque
- Gráficas circular y de columnas para representar consumo de los compresores

Las herramientas estadísticas que se utilizarán serán

- Diagrama de máximos y mínimos: consumos de potencia en los compresores.
- Promedios y desviaciones estándar: de consumo energético por compresor.
- Diagrama de dispersión: para consumos energéticos en el tiempo.

11. CRONOGRAMA



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría. Siendo la investigación descriptiva, además se tendrán en cuenta los siguientes recursos.

Tabla VII. **Factibilidad de estudio**

Recurso	Costo
Renta de equipo de sensor de fugas	Q 1,500.00
Movilización	Q 500.00
Asesor	Q 2,500.00
TOTAL	Q 4,500.00

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Avallone, E., & Baumeister, T. (1995). *Manual del ingeniero mecánico* (9 ed.). Mexico D.F.: McGraw-Hill.
2. *Cagi Compressed air & gas institute*. (2012). Obtenido de Working with compressed air.
3. Campos Avella, J. C. (2000). *Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido*. Colombia.
4. CS Instruments. (2016). Catalogue for measuring professionals.
5. Garcia, E. (2005). *Aplicacion 6 sigma para evaluar equipos principales de una estacion de compresion de gas natural*. Guanajuato: Tesis Universidad de Guanajuato.
6. Kaeser Kompressoren SE. (2016). *Kaeser*. Obtenido de Compressed air engineering: <http://www.kaeser.com/int-en/download.ashx?id=tcm:17-4888>.
7. Labastida, C., Astorga, M., Zamora, O., & Venegas, V. (2005). *Propuesta de mantenimiento preventivo a compresores Atlas Copco*. México: Instituto Politecnico.

8. Mark, R. (2005). Equation of state influences on compressor performance determination. *Turbomachinery simposium*, (págs. 121-129). Houston.
9. McKee, R. H. (2000). *Compressor station energy audit methodology and benefits*. Texas.
10. Moreno Gil, J. (2012). *Turbinas y Compresores de Gas*. Madrid; S.A. Marcombo.
11. Munoz Padron, E. (2014). *Reingeniería de la red de aire comprimido, planta suavizante de ropa*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
12. Nieto , C. (s.f.). *E-ure*. Obtenido de Sistema de aire comprimido: <http://www.si3ea.gov.co/Eure/7/inicio.html>.
13. Severns, W. H., Degler, H. E., & Miles, J. C. (1996). *Energía mediante vapor, aire o gas*. Barcelona, España: Reverte, S.A.
14. Sustainability victoria. (5 de 2 de 2005). *Sustainability victoria*. Obtenido de Energy smart compressed air systems: <http://www.sustainability.vic.gov.au/>.
15. Tavares, L. (1996). *Administracion moderna del mantenimiento*. Rio de Janeiro.