



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE
MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**

Manuel Daniel Roberto Tzul Sián

Asesorado por el Mtro. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE
MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL DANIEL ROBERTO TZUL SIÁN

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JOSUÉ MIGUEL RAMÍREZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Gómez Rivera
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Roxana Yanina Castillo Guzmán
EXAMINADORA	Inga. Sigrid Alitza Calderón de León
EXAMINADORA	Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

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 INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de noviembre de 2020.

Manuel Daniel Roberto Tzul Sián

Ref. EEPFI-1538-2020

Guatemala, 20 de noviembre de 2020

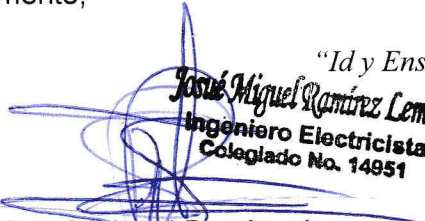
Director
Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Presente.

Estimado Ing. Urquizú:

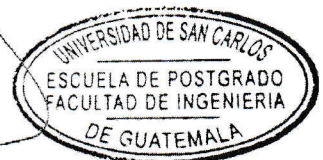
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**, presentado por el estudiante **Manuel Daniel Roberto Tzul Sián** carné número **200011052**, quien optó por 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 en Artes en Energía y Ambiente.

Y 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 Décimo, 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.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Josué Miguel Ramírez Lemus
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 14951
Mtro. Josué Miguel Ramírez Lemus
Asesor


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético




Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIMI-076-2020

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 Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**, presentado por el estudiante universitario Manuel Daniel Roberto Tzul Sián, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, noviembre de 2020

DTG. 402.2021

La Decana 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 PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN DE CONSUMOS Y DETECCIÓN DE FUGAS, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**, presentado por el estudiante universitario: **Manuel Daniel Roberto Tzul Sián**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas y sobre todo darme vida.
Mi padre	Daniel Tzul (q. d. e. p.), por enseñarme sobre la fe en Dios y ser un buen ejemplo, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
Mi madre	Joaquina Sian, por su amor incondicional y apoyo en todo momento para lograr esta meta.
Mis hermanas	Sara, Raquel, Aura, Sofia, Lucrecia y Orfa Tzul, por su aporte a mis estudios, su cariño, su apoyo, sus ánimos y su grata compañía.
Mis cuñados	Luis Quevedo, Eduardo Culajay, Jaime Sepez, Mynor Ecute, Víctor Catalán y Luis Coco, por sus consejos y grata compañía.
Mis tíos	Lucila, Angelina, Paula, Berta, Daniel y Eliseo Sian, por tantos años de cariño y aprecio.
Mis amigos	Víctor y Carlos Guerrero, inseparables desde el inicio de nuestras carreras, por su aprecio y apoyo en todo momento. A José García, por su

apoyo en otros idiomas. A cada compañero en la universidad, son tantos los que me han apoyado y ayudado, mi sincero agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Industria licorera	Por haberme brindado la información necesaria para realizar este diseño de investigación.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante la carrera.
Mi asesor	Mtro. Josué Ramírez, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Jefe de planta	Ing. Geovanny Yool, quien me permitió realizar la investigación en su sistema de aire comprimido a cargo.
Familia y amigos en general	

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. General	15
5.2. Específicos	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO	19
7.1. Aire comprimido	19
7.2. Propiedades de aire comprimido	19
7.2.1. El aire comprimido es energía	20
7.3. Unidades de medición	21
7.4. Aplicaciones en la industria	22

7.5.	Tipos de compresores de aire comprimido	23
7.5.1.	Compresores rotativos	24
7.5.2.	Compresores alternativos.....	25
7.6.	La variación de velocidad en los compresores de aire	27
7.6.1.	Velocidad fija	27
7.6.2.	Velocidad variable	28
7.7.	Calidad del aire comprimido	29
7.7.1.	Unidad de mantenimiento.....	32
7.7.1.1.	Reguladores de presión	32
7.7.1.2.	Filtros micrónicos y submicrónicos	33
7.7.1.3.	Lubricación del aire comprimido	34
7.7.1.4.	Filtros de carbón activado	34
7.7.1.5.	Separadores de humedad.....	35
7.7.1.6.	Unidad de lubricación.....	36
7.8.	Secadores del aire comprimido	36
7.8.1.	Secado por refrigeración	36
7.8.2.	Secado por adsorción.....	37
7.8.3.	Secado por membrana	37
7.9.	Tipos de redes en sistemas de aire comprimido.....	38
7.9.1.	Red de lazo abierto.....	38
7.9.2.	Red de lazo cerrado	39
7.10.	Tecnologías de medición para el análisis de consumos y fugas	39
7.10.1.	Consumo de aire comprimido.....	40
7.10.1.1.	Flujo volumétrico	40
7.10.1.2.	Flujo másico	41
7.10.1.3.	Puntos de medición para los consumos	41
7.11.	Fugas del aire comprimido	42

7.11.1.	Mediciones por ultrasonido.....	43	
	7.11.1.1. Clasificación de fugas	43	
7.11.2.	Mediciones a través de caudales con equipo en reposo y en operación	44	
7.11.3.	Puntos de medición de fugas	44	
7.12.	Medición de la presión y detección de caídas de presión.....	45	
	7.12.1. Mediciones discretas	45	
	7.12.2. Mediciones continuas	46	
	7.12.3. Puntos de medición de la presión	46	
7.13.	Análisis de consumos	46	
	7.13.1. Medición inicial para determinar línea base energética	47	
		7.13.1.1. Consumos con equipo en operación....	47
		7.13.1.2. Consumos con equipo en reposo	47
		7.13.1.3. Cuantificación de las fugas	48
7.14.	Medición inicial con equipo ultrasónico para determinar ubicación de fugas.....	48	
	7.14.1. Identificación de las fugas en el sistema.....	48	
		7.14.1.1. Corrección de las fugas.....	48
7.15.	Medición inicial de la caída de presión en puntos críticos de la planta.....	49	
	7.15.1. Caídas de presión debidas al diseño	49	
	7.15.2. Caídas de presión debidas a los accesorios y tubería.....	50	
	7.15.3. Las caídas de presión y la perdida de eficiencia.....	50	
7.16.	Metodología ISO 50001 aplicada en eficiencia energética al sistema de aire comprimido	51	
	7.16.1. El sistema de gestión de la energía norma ISO 50001	51	

7.16.2.	Términos y definiciones norma ISO 50001	51
7.17.	Política energética	52
7.18.	Revisión energética	52
7.19.	Planificación energética.....	54
7.20.	Línea base energética	54
7.21.	Seguimiento medición y análisis	54
7.21.1.	Auditorías internas de la eficiencia energética.....	55
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	57
9.	METODOLOGÍA	61
9.1.	Tipo de estudio	61
9.2.	Definición de variables.....	61
9.3.	Fases del estudio.....	63
9.3.1.	Fase 1: exploración bibliográfica.....	63
9.3.2.	Fase 2: recolección de datos sobre mediciones de caudal y determinación de fugas en el sistema de aire	64
9.3.2.1.	Recolección de datos para establecer la línea base en la mejora de eficiencia energética.....	64
9.3.3.	Fase 3: selección del método para mejorar la eficiencia energética.....	66
9.3.3.1.	Cuantificar materiales necesarios para realizar correcciones.....	66
9.3.3.2.	Definir acciones que se pueden realizar de forma inmediata sin incurrir en paros prolongados	66
9.3.3.3.	Planificar de los cambios necesarios...	67

	9.3.3.4.	Ciclo de mejora continua ISO 50001 ...	67
	9.3.4.	Fase 4: Estimación de la caída de presión y pérdida de eficiencia.....	69
	9.3.4.1.	Contabilizar los puntos de medición de la presión	70
	9.3.4.2.	Definir correcciones necesarias para disminuir la caída de presión.....	71
	9.3.4.3.	Establecer procesos donde se puede utilizar una presión de 4Bar (60psi)	72
	9.3.5.	Fase 5. Determinación del ahorro en costo energético y la mejora en eficiencia al establecer las correcciones necesarias	72
	9.3.5.1.	Determinando el ahorro energético.....	76
	9.3.5.2.	Distribución de la energía en el sistema de productivo	76
	9.4.	Fase 6: presentación y discusión de resultados.....	77
10.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	79
11.		CRONOGRAMA.....	81
12.		FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	83
13.		REFERENCIAS.....	85
14.		APÉNDICES	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Relación entre presión absoluta, atmosférica y manométrica	22
2.	Imagen sobre los compresores rotativos.....	24
3.	Rotores helicoidales de un compresor de tornillo y flujo en el sistema	25
4.	Tipos de compresores de pistón o reciprocantes.....	26
5.	Controladores de frecuencia variable y gráfica de PWM	29
6.	Tipos y tamaños de impurezas comunes en el aire (1 micra =0.001 mm).....	30
7.	Unidad de mantenimiento básica y su simbología neumática	33
8.	Imagen de un filtro de partículas sólidas y sus posibles filtrajes.....	34
9.	Imagen ilustrativa de un filtro de carbón activado	35
10.	Esquema de lazo abierto para aire comprimido.....	38
11.	Imagen ilustrativa de una red de lazo cerrado	39
12.	Ilustración de un módulo de eficiencia energética para medición continua	40
13.	Punto para tomar en cuenta para la revisión energética	53
14.	Diagrama de flujo del recorrido en planta.....	64
15.	Descripción detallada del ciclo de mejora continua basado en ISO 5001	68
16.	Adaptación del ciclo de mejora continua para la eficiencia energética.....	69
17.	Gráfico de barras representativo de la caída de presión	71
18.	Imagen ilustrativa de módulos de eficiencia.....	73

19.	Gráfico comparativo de indicadores de eficiencia energética.....	75
20.	Gráfico de ahorro energético por área de producción	76
21.	Gráfico sobre la distribución de la energía en el sistema productivo y el dinero que representa.....	77

TABLAS

I.	Unidades fundamentales y derivadas en Sistema Internacional	21
II.	Cuadro sobre la calidad del aire tomando en cuenta sólidos, agua y aceite	31
III.	Medidas de tamaño de orificio y su pérdida de flujo y energía.....	44
IV.	Ejemplo sobre pérdidas de presión en un sistema de aire comprimido	50
V.	Definición de variables.....	61
VI.	Cuadro para recopilación de datos en el recorrido de planta	65
VII.	Listado de ubicaciones para el control de las mediciones realizadas	65
VIII.	Listado de materiales para correcciones.....	66
IX.	Resumen de acciones que no requieren tiempo de paro prolongado.....	67
X.	Resumen de acciones que requieren tiempo de paro prolongado	67
XI.	Registro de presión para determinar la caída de la misma en el sistema	70
XII.	Registro de acciones a realizar para disminuir la caída de presión.....	71
XIII.	Registro de presión antes y después de la revisión.....	72
XIV.	Datos sobre consumos de aire y estimación energética que representa.....	73
XV.	Registro de indicadores por área y equipo.....	75
XVI.	Cronograma de actividades.....	81

XVII. Recursos de la investigación 84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Bar	Bares
HP	Caballos de fuerza
Hz	Herz
kPa	Kilo pascales
KgCO₂	Kilogramos de dióxido de carbono
kWh/año	Kilowatt hora sobre año
psi	Libra sobre pulgada cuadrada
m³	Metros cúbicos
Pa	Pascales
\$MXN	Pesos mexicanos
Q	Quetzales
V	Voltio
VAC	Voltios de corriente alterna
W	Watts

GLOSARIO

Ahorro energético	Busca realizar cortes en el consumo de energía, para disminuir el costo que representa su uso.
Capacitación	Acción instruir en una nueva disciplina o bien profundizar en conocimientos para ser utilizados en el lugar de trabajo.
Ciclo continuo	Cuando un equipo o maquinaria de fabricación realiza operaciones completas de forma continua para producir los artículos para la que fue diseñada.
Ciclo de prueba	Cuando un equipo o maquinaria de fabricación realiza una operación a velocidad lenta o bien de un solo artículo, para poder establecer que todo marcha bien.
Eficiencia energética	Busca mejorar un sistema para reducir la cantidad de energía requerida, para obtener un producto o brindar un servicio.
GEI	Gas de efecto invernadero.
HMI's	Interfaz hombre-máquina, de las siglas en inglés, <i>Human Machine Interface</i> .

- ISO** Significa Organización Internacional de Normalización o más conocida por sus siglas en inglés ISO (*International Standar Organization*).
- PLC's** Controlador lógico programable, de sus siglas en inglés, *Programable Logic Control*.

RESUMEN

El uso eficiente de la energía es un tema de suma importancia debido a que esto significa poder producir utilizando de mejor manera la energía que se tiene a disposición, entre las cuales está la energía almacenada en el aire comprimido, la cual se libera en el momento de su utilización, ya sea en cilindros neumáticos, en válvulas direccionales, o bien sistemas automatizados donde se puede realizar ciclo de prueba, ciclo único y ciclos continuos, e incluso tener recetas en los sistema de control.

La eficiencia energética en un sistema de aire comprimido es algo que no se verifica de forma continua y esto permite que se pierda de vista, de tal manera que puede aumentar el costo de fabricación al tener fugas y desperdicios no identificados. También puede darse el hecho de requerirse realizar un ahorro, cuando no se tiene idea de que tan eficiente es el sistema de aire comprimido, lo cual es importante.

El sistema de aire comprimido está asociado directamente a un consumo de energía eléctrica, debido a que son motores los que generan el movimiento de un compresor y es un medio muy utilizado en automatización para la producción, ya que el aire es una energía limpia para producir.

La metodología se enfoca en lo útil que resulta realizar mediciones de consumo de aire comprimido en las máquinas, estableciendo primero una línea base al definir cuál es el consumo inicial antes de realizar cualquier acción enfocada mejorar la eficiencia del sistema. Al momento de realizar las mediciones se busca seguir los lineamientos de gestión energética, a fin de establecer las

directrices para poder efectuar una auditoría de eficiencia energética, que pueden replicarse en cualquier sistema de aire comprimido, ya que de forma generalizada se pueden aplicar a cualquier sistema.

Al final se puede llevar establecer la eficiencia actual del sistema de aire comprimido, para posteriormente definir las acciones a seguir a fin de mejorar dicha eficiencia, disminuyendo las fugas identificadas, los desperdicios o mal aprovechamiento de aire, estableciendo indicadores validos respecto a la producción en la cual se utiliza el aire comprimido.

1. INTRODUCCION

En la actualidad existen varias empresas en Guatemala que tienen sistemas de aire comprimido, en los cuales no se realiza ninguna medición sobre consumos de aire comprimido y tampoco se realiza una revisión periódica para definir si hay fugas de aire, también se hace uso deficiente al utilizar el aire en acciones de limpieza. Esto produce un gasto no eficiente de la energía, ya que para producir el aire comprimido es necesario utilizar energía eléctrica en los compresores y las fugas pueden producir caídas de presión considerables y esto se convertirá en un costo alto por comprimir el aire para ser utilizado en sistemas productivos.

Las mediciones de consumo de aire comprimido y detección de fugas serán importantes para poder tener un registro de aire utilizado en procesos productivos, así como la energía que esto representa, lo cual permitirá establecer medidas correctivas a fin de mejorar la eficiencia energética en los equipos de producción. Este trabajo brindará una herramienta metodológica para poder establecer una línea base, a partir de allí planificar mejoras tanto de las instalaciones, como en el uso de la energía en el sistema de aire comprimido y establecer indicadores de eficiencia energética prácticos.

Uno de los beneficios para realizar este trabajo de investigación es reducir la caída de presión que se da a raíz de tener fugas de aire comprimido en el sistema, así como el ahorro energético al momento de mejorar el uso eficiente de la energía al establecer que la limpieza por medio de aire en un equipo no debe superar los 2 Bar (30 psi) de presión, ya que es contraproducente por el costo que representa generar el aire comprimido y mantener los equipo en operación.

El mayor beneficio será determinar cuanta energía se desperdicia en fugas, cuantificar el costo y cuánto se logra ahorrar al mejorar la eficiencia de consumo, así como establecer mediciones periódicas para mantener una buena eficiencia energética.

Para el desarrollo de este trabajo será necesario hacer uso de instrumentos de medición, específicamente un módulo que se compone de dos piezas básicas, un medidor de flujo volumétrico con sensor de presión y temperatura integrado, y un medidor de ultrasonido propagado en el aire para poder identificar dónde hay fugas, que pueden ser imperceptibles a simple vista, o con el ruido de los equipos a veces pasan desapercibidas. Con este equipo se determinará el consumo energético en L/min, lo cual puede traducirse en kWh de energía consumida en términos de aire comprimido en los procesos productivos de la planta, también puede determinarse las fugas, que serían un desperdicio de energía, y haciendo un recorrido en planta se verificará donde hay uso ineficiente de energía en actividades de sopleteo para limpieza y se establecerá donde realmente es necesario establecer una presión segura (2Bar = 30psi) para poder realizar la actividad.

En el primer capítulo, se describirán los antecedentes importantes y recomendaciones en sistemas de aire comprimido para realizar este trabajo. En el segundo capítulo, se realizará una exploración bibliográfica sobre los fundamentos teóricos de este trabajo de investigación, tales como propiedades del aire comprimido, medios para comprimir el aire, eficiencia energética, ente otros. En el tercer capítulo, se tratará el tema de realizar mediciones de consumo y la detección de fugas, para poder establecer una línea base energética, esta es referencia para establecer la mejora en la eficiencia energética del sistema. En el cuarto capítulo, se definirá un método para poder mejorar la eficiencia en el sistema, puesto que ya se tiene contabilizada la medida y distribución de la

energía en concepto de flujo utilizado en los equipos. En el quinto capítulo, se determinará la caída de presión existente, ya que esto permite establecer si hay parámetros de diseño que puedan mejorarse, y si hay alguna fuga no identificada en la primera inspección a realizarse través de las mediciones tratadas en el tercer capítulo. En el sexto capítulo, se determinará el ahorro energético en términos monetarios para el cliente, así como la mejora en eficiencia energética a través de realizar correcciones oportunas que se identificaran a través de este trabajo.

Por último, se tiene la presentación de resultados en el capítulo siete y su discusión en el capítulo 8, que básicamente será una interpretación de aspectos técnicos, que pueden ser de dominio para cualquier lector, haciendo uso ordenado de los datos aplicando un ciclo de mejora continua basado en la norma ISO 50001.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala se han llevado a cabo estudios para determinar la eficiencia energética en diferentes industrias, donde se hacen recomendaciones acerca de los sistemas de aire comprimido, para poder contribuir a la eficiencia del sistema. A continuación, algunos que aportan datos importantes:

En la tesis *Metodología de una Auditoria de Eficiencia Energética en la Industria Alimenticia* donde Vega (2018), indicó la necesidad de realizar mediciones de consumo para establecer un diagnóstico y poder efectuar mejoras, a fin de reducir los costos energéticos en la producción del aire comprimido, se indica una mejora mínima del 5 % a partir de los cambios. También se recomienda realizar una revisión periódica del sistema de aire comprimido, para identificar fugas, pérdidas de carga o presión, selección adecuada de equipos consumidores del aire, el uso inadecuado del aire comprimido y prácticas que producen desperdicio del mismo a fin de reducir el costo energético.

En la publicación *Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido industrial* de Ordóñez y Cifuentes (2016), ellos han definido que existen métodos para optimizar el uso del aire comprimido: Desde la generación de aire comprimido hasta la selección de tecnología, pasando por la distribución del aire comprimido en un circuito de lazo cerrado y la preparación del aire comprimido donde se puede optimizar el sistema, reflejándose en la factura de energía eléctrica.

Al realizar un diagnóstico en un sistema de aire comprimido, Gutiérrez (2017) concluyo que: “Las pérdidas de presión en el sistema de aire comprimido ascienden a un 39,4 %, porcentaje que se encuentra muy por encima del rango de pérdida admisible y que el costo de dichas perdidas ascendía a Q. 70,070.06/anuales” (p. 58), para una industria de grasas y aceites, monto que es muy considerable de poder mejorar; y lo que se advierte es eliminar fugas, estandarizar diámetros de tuberías al diámetro menor optimo y con esto logro reducir Q. 27,290.00 del total antes descrito.

Barrientos (2017) en su trabajo sobre *Optimización de la red de aire comprimido en el área de servicio rápido de Ingenio Pantaleón*, realizó una tabla sobre los costos de una fuga, en función del diámetro de tubería. Esto servirá para poder realizar una tabla propia en la industria bajo estudio y de esta manera cuantificar de forma cualitativa y cuantitativa la mejora al reducir pérdidas de energía en fugas.

En otros países de la región Latinoamericana se revisaron algunos trabajos sobre el tema de eficiencia energética en el uso del aire comprimido, de lo cual se obtuvo información relevante, siendo algunas las siguientes:

En la ciudad de México: Alanís, Beltrán y Velarde (2018), realizaron un trabajo de análisis sobre: *Eficiencia Energética para Empresas que Utilizan Aire Comprimido en su Proceso de Producción*. Se define que el ahorro energético puede mejorarse en un 20 %, a través de realizar mediciones de consumo energético de la capacidad instalada en los compresores. Se hace una medición para determinar las fugas en la planta de producción, para establecer el total que representan las mismas y una vez identificada la fuga se corrige.

Por último, al igual que Vega (2018) se recomienda hacer mediciones periódicas para mantener en óptimas condiciones el uso de la energía en el sistema de aire comprimido. En este trabajo se estableció definir el costo en \$MXN por kWh/año por operación de los compresores para establecer la mejora en costo al aumentar la eficiencia del sistema.

En la tesis realizada por Bobadilla (2019), en Colombia sobre *Evaluación de la Eficiencia Energética, del Sistema de Aire Comprimido en una Clínica Privada de Alta Complejidad, ubicada en la ciudad de Barranquilla* se indica que el aire comprimido es un alto consumidor de energía y normalmente es olvidado en los programas de ahorro de energía de las distintas instituciones. Un dato importante es que el sistema de aire comprimido puede representar hasta el ocho por ciento de la energía en industrias colombianas.

Por lo tanto, las ineficiencias en los sistemas de aire comprimido pueden ser significativas. Luego de mejorar el sistema, el ahorro de energía puede oscilar entre el 12 % o más, para ello se recomienda utilizar el modelo de gestión de la energía ISO 50001, y esto contribuye directamente a la huella ecológica de carbono, ya que mejorar la eficiencia equivale a menor consumo de energía para hacer el mismo trabajo, reduciendo las emisiones de CO₂, ya que se logró una reducción de 12,551 Kg de CO₂, esto represento una mejora en costo de \$7,442,096.83 pesos colombianos.

También, en el trabajo de investigación realizado en Colombia por Fajardo, Cuchimba, Escobar y Marulanda (2019), titulado: *Propuesta de auditoría energética para la industria aplicada a un caso de estudio del sector plástico*, se indica como la metodología de ISO 50001, permite mejorar a través de un diagnóstico energético la eficiencia, sin embargo no concluyen sobre la tecnología específica a utilizarse para las mediciones en consumos de aire, se

enfoca más en calidad de la energía, considera pertinente adoptar dicha metodología en el diagnóstico energético, a fin de poder obtener las mediciones y recomendaciones sobre la eficiencia energética.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de producción se dedica al envasado de bebidas, tiene más de 30 años de estar en operaciones y debido al aumento en la demanda de productos, se han realizado cambios en el ordenamiento de sus líneas de producción y esto a su vez en la matriz de generación del aire comprimido. Actualmente una política de la empresa es mejorar su eficiencia en el uso de la energía; en este sentido el aire comprimido es energía almacenada en los sistemas de distribución de la planta que se utiliza para producir de forma automatizada en líneas de producción en turno diurno de 8 horas al día.

Dado el aumento en producción y del requerimiento en aire comprimido, se han realizado estudios por parte del proveedor de los compresores, por lo cual se tiene una capacidad instalada de 80 HP compuesta de 2 compresores, con motores trifásicos 220 VAC, sin embargo, la planta sigue en crecimiento y se han dado cambios que afectan en el diseño original del sistema de distribución, a esto se debe sumar el uso inadecuado del aire comprimido, que es otra causa en la pérdida de eficiencia.

En un recorrido realizado en la planta, se ha observado el desperdicio el aire comprimido, debido a que los operarios de maquinaria lo utilizan para limpieza en los equipos a toda la presión (cerca de 100 psi, o sea 6.8 Bar), esto es una pérdida directa de la eficiencia al desperdiciar energía de esta manera. Si, a esto le sumamos las fugas que existen en el sistema de aire comprimido, hay una mayor ineficiencia y no se han realizado mediciones para determinar cuánto aire comprimido se desperdicia en fugas.

Lo anterior conduce a un alto costo en la producción del aire comprimido cuando no se ha realizado mediciones para establecer una buena eficiencia energética, puesto que el alto consumo de energía eléctrica está asociado directamente a la capacidad instalada para mantener la operación y esto significa que se utiliza recursos energéticos para mantener una presión por arriba de 6 Bar.

Otro punto importante donde se puede mejorar la eficiencia se da en los puntos donde hay caída de presión. Una caída de presión puede causar paros en producción, una mala calidad en la producción y por ende pérdida de eficiencia en producción.

El aire comprimido es energía que puede ser liberada en actuadores neumáticos por medio de ciertos automatismos, como válvulas, conectores, mangueras, controlados a través de PLC's, HMI's y es necesario el uso de energía eléctrica debido a todos los elementos que intervienen para los sistemas de control. De no prestar atención a la eficiencia del sistema de aire comprimido se incurre en un mayor costo de producción.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio:

¿Se podrá implementar un módulo de medición de consumos y detección de fugas, mejorar la eficiencia energética en un sistema de aire comprimido?

Para poder responder a esta interrogante, es necesario contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cómo se podrán identificar las fugas por medio de un equipo de medición de consumos de aire comprimido y ultrasónico?

- ¿Cuál será el mejor método para corregir el uso deficiente de energía en forma de aire comprimido dentro de la planta de producción?
- ¿Se puede reducir la caída de presión para evitar pérdidas de eficiencia energética en el sistema de aire comprimido a través de establecer puntos de mejora?
- ¿Cuál será el ahorro en costos por fugas y desperdicios en el uso del aire comprimido?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía, del área de gestión energética, de la Maestría en Energía y Ambiente.

La eficiencia energética es un criterio esencial en la actualidad, debido a que representa menos consumo de energía, de tal forma que con el mismo consumo de energía se puede producir más, logrando una reducción de costos. También se pueden tener ahorros en cuanto a la capacidad instalada de recursos energéticos, ya que con menos energía se produce la misma cantidad de producto y está directamente asociada a una reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), puesto que reducir la cantidad de energía utilizada, contribuye a reducir dicho gas. La eficiencia energética es una manera inteligente de incrementar la rentabilidad de una empresa, como se ha mencionado reduce los costos y se puede producir más con la misma energía.

Como producto de la investigación, al momento de realizar las mediciones en la diferente toma de aire comprimido en la maquinaria se puede cuantificar a través del equipo ultrasonido el punto exacto de la fuga y con ello eliminar por completo el desperdicio ocasionado. Una fuga de aire representa un desperdicio de energía y contribuye en la caída de presión en la tubería o sistema de aire comprimido. También se hace uso del aire para actividades de limpieza a toda presión, lo cual también es un desperdicio de energía y debe establecerse donde si es necesario a la presión debida.

El resultado de la presente investigación beneficiará no solo a la industria donde se realiza, sino también a otras industrias de alimentos, industrias farmacéuticas y en general a cualquier industria que utilice aire comprimido como fuente de energía en la automatización de sus procesos para fabricación, llenado, empaque y cualquier otra función que lo requiera, esto a través de utilizar un módulo de mediciones en consumos y detección de fugas en las instalaciones actuales.

La investigación será de ayuda al medio ambiente, ya que una mejora en la eficiencia energética está ligada directamente a una menor generación de gases de GEI, puesto que el sistema de aire comprimido depende de la energía eléctrica y esta a su vez depende de su fuente de generación, que en la matriz energética de generación guatemalteca aún se tiene un porcentaje del 34.3 % a través de fuentes no renovables. Esto se puede plasmar en un ahorro económico al cuantificar la mejoría energética.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Implementar un módulo de medición de consumos y detección de fugas, para mejorar la eficiencia energética en un sistema de aire comprimido.

5.2. Específicos

- Identificar las fugas por medio de un equipo de medición de consumos de aire y ultrasónico.
- Definir un método para corregir el uso deficiente de energía en forma de aire comprimido dentro de la planta de producción.
- Reducir la caída de presión para evitar pérdidas de eficiencia energética en el sistema de aire comprimido a través de establecer puntos de mejora.
- Calcular el ahorro en costos por fugas y desperdicios en el uso del aire comprimido.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Se identifica la necesidad de definir una metodología para la mejora en la utilización del aire comprimido, dentro de la industria en general después de algunos años de operación, se tienen cambios en las líneas de producción, en su mayor parte debido al crecimiento de la demanda, pocas veces se toma en cuenta hacer uso de una metodología para establecer consumos y detectar fugas, sin embargo, esto para la eficiencia energética dentro de una planta de producción es muy necesario.

La causa principal en el aumento de la capacidad instalada de aire comprimido, está directamente asociada al aumento en la demanda de productos y al crecimiento de las empresas, sin embargo, un sistema de aire comprimido que ha sufrido modificaciones a raíz de crecer necesita que se realicen mediciones para verificar posibles pérdidas de eficiencia, a fin de evaluar si es necesario incrementar la generación con otro compresor, lo cual representa una inversión o también está la vía de mejorar el uso eficiente de la energía con lo que ya se tienen instalado, de esta manera con la misma energía producir más unidades.

Otra necesidad detectada al realizar un recorrido en la planta de producción es el uso inadecuado que se le da a la energía, al desperdiciar el aire comprimido en actividades que se han vuelto un hábito para los operadores, y para esto es necesario aplicar algunos lineamientos a fin de mejorar el uso y evitar estas pérdidas de eficiencia. También está poder realizar mediciones para determinar la cantidad de energía que se desperdicia en fugas y acá es importante utilizar

equipo portátil de ultrasonido, para indicar el punto exacto de dicha fuga al pasar la sonda de ultrasonido por la tubería o conexiones de mangueras.

La necesidad de establecer el costo por producción de aire comprimido como línea base al realizar una medición, servirá para definir la mejora en cuanto a eficiencia a través de determinar el costo de fugas, el costo de los desperdicios y el costo sobre los usos inadecuados del aire comprimido. También es muy útil poder determinar la caída de presión a través de mediciones puntuales en la línea de distribución del aire comprimido, pues esto representa una pérdida de eficiencia y podría estar acompañado de un paro en producción cuando dicha caída afecta a la presión nominal de operación de un equipo. Algunos equipos tienen monitoreo de la presión para asegurar un excelente funcionamiento y la producción, por tal razón se debe medir la presión para identificar donde hay perdidas que puedan afectar la producción.

Los beneficiarios directos son los operadores de equipos de producción, quienes tienen una medición sobre la eficiencia y requieren la máxima disponibilidad de los mismos. Así como el personal técnico de ingeniería y mantenimiento, quienes podrán tener una reducción de fallas. Y como parte de esta investigación se proveerá de un manual con la metodología aplicada al realizar las mediciones, el seguimiento y auditoria en el mantenimiento de la eficiencia energética del sistema de aire comprimido.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Aire comprimido

El aire comprimido se obtiene a través de aumentar la presión del mismo, contenido en un sistema de compresión para poder reducir su volumen, mientras más reducido este el volumen mayor es la presión, esto generalmente se lleva a cabo en un equipo mecánico conocido como compresor de aire.

El aire en sí, es una mezcla de gases; en términos generales compuesto de: nitrógeno, oxígeno y el resto de gases contenidos en la atmósfera, esto es 78 %, 21 % y 1 % respectivamente, el hecho de que el aire se puede comprimir es una de sus propiedades, de las cuales se abordará el tema de forma breve a continuación (Zhimnaycela y Camposano, 2011).

7.2. Propiedades de aire comprimido

El aire básicamente es incoloro, no tiene sabor alguno, tampoco tiene olor alguno, y puede ser almacenado ya que ocupa el volumen y la forma del espacio que lo contiene y es abundante de tal forma que está disponible para su compresión, esta es la propiedad de compresibilidad la cual indica que puede modificarse su volumen al ser comprimido (Boge compresores, s.f.).

No hay riesgo de explosión o incendio y debidamente tratado es limpio, apto para la industria de alimentos o farmacéuticos.

El aire comprimido es fácil de transportar, y tiene la propiedad de volver a su volumen inicial cuando disminuye la fuerza responsable en su reducción de volumen y tiene la propiedad de expandirse para ocupar el volumen de cualquier recipiente que lo contenga (Gutiérrez, 2017).

El aire es muy fluido, de transporte sencillo, y se puede generar aire comprimido en cualquier lugar y en grandes cantidades, debido a que se encuentra en bastedad en nuestra atmósfera.

7.2.1. El aire comprimido es energía

En cada planta industrial el aire comprimido es una fuente de energía, al igual que la corriente eléctrica, cada una de ellas tiene comportamientos diferentes y es necesario usar electricidad para producir aire comprimido. Como se mencionó antes, el aire comprimido tiene propiedades muy buenas y se considera que el aire que nos rodea es una fuente ilimitada de energía. En la Edad Antigua ya se sabía que el aire permite transportar energía, el concepto de tratar con el aire comprimido como una fuente de energía muy indispensable “Se desarrolló en su mayor parte a partir del año 1950, primero en los Estados Unidos, posteriormente en Alemania” (Hesse, 2002, p. 9).

El aire una vez comprimido provee energía que se puede almacenar, de tal forma que se cuenta con la capacidad de poder realizar un trabajo al liberar dicha energía en sistemas neumáticos (sistemas que utilizan aire comprimido), a través de cilindros o actuadores de movimiento lineal o rotativo que ejecutan una acción productiva dentro de las plantas industriales.

7.3. Unidades de medición

Para entender mejor los sistemas de aire comprimido es necesario definir algunas unidades de medida (conocidas también como dimensionales de medida) que se utilizan en dichos sistemas, teniendo básicamente unidades fundamentales y unidades derivadas, como se muestra en la tabla I.

Tabla I. **Unidades fundamentales y derivadas en Sistema Internacional**

Las siete dimensiones fundamentales (o primarias) y sus unidades en el sistema internacional		Las principales unidades derivadas utilizadas en aire comprimido		
Dimensión	Unidad	Dimensión	Unidad	Símbolo
Longitud	metro (m)	Fuerza	Newton	N
Masa	kilogramo (kg)	Superficie	Metro cuadrado	m ²
Tiempo	segundo (s)	Volumen	Metro cúbico	m ³
Temperatura	kelvin (k)	Caudal	Metro cúbico por segundo	M ³ /s
Corriente Eléctrica	Ampere (A)	Presión	Pascal	Pa
Cantidad Luminosa	Candela (cd)			
Cantidad de Materia	mol (mol)			

Fuente: Cengel y Boles. (2014). *Termodinámica*.

Según Lleó y Lleó, (2011), normalmente se tiene que hacer operaciones de cálculo con dichas unidades de medida y se debe tener cuidado al momento de utilizarlas, para no mezclar el sistema internacional con el sistema inglés o algún otro sistema de medidas, siendo la presión un tema muy importante debido a que es la fuerza aplicada sobre una superficie específica, y se debe definir que existe la presión atmosférica, que no es más que el aire contenido en nuestra atmósfera ejerciendo presión sobre cada objeto contenido en la tierra.

Méndez (2009) también se debe distinguir la presión manométrica de la presión absoluta, siendo la presión absoluta la suma de la presión atmosférica y la presión manométrica. La presión es muy importante no solo en términos de

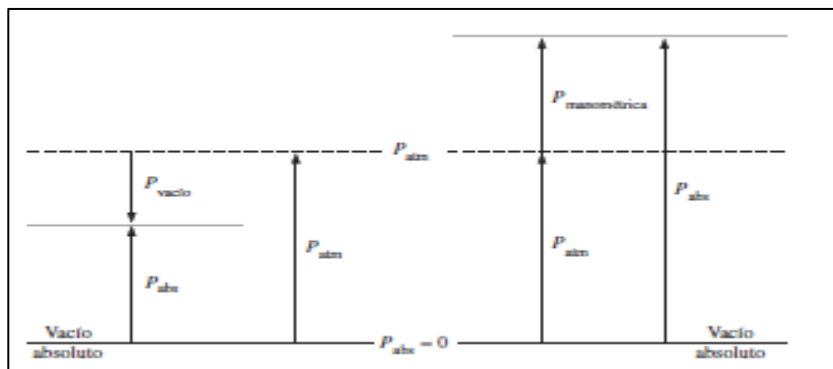
aire comprimido, véase la figura 1 para tener una idea más clara sobre la presión absoluta, manométrica y atmosférica, el fenómeno de expandirse y poder comprimirse el aire se describe bien con la ley de Boyle:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- P_1 = presión inicial
- P_2 = presión final
- V_1 = volumen inicial
- V_2 = volumen final

Figura 1. **Relación entre presión absoluta, atmosférica y manométrica**



Fuente: Cengel y Boles. (2014). *Termodinámica*.

7.4. Aplicaciones en la industria

Debido a la abundancia del aire, sus propiedades al comprimirse y el poder almacenarse de forma segura, el aire comprimido se puede utilizar de dos

maneras: como energía y como parte de un proceso de fabricación o transformación industrial. Primero, la energía almacenada como aire comprimido provee la capacidad de realizar un trabajo mecánico, alimentando equipos e instalaciones industriales neumáticas. Segundo, como parte activa de un proceso, donde el aire entra en contacto con el producto y la calidad del aire comprimido (libre de contaminantes) es muy importante para asegurar la inocuidad del proceso (Atlas Copco, 2019).

El aire comprimido se puede utilizar en hacer perforaciones o para mover de posición en diferentes sentidos una pieza, para sujetar, doblar, extraer de su lugar o ingresar en un espacio para empaque final y otras diversas actividades que normalmente una persona haría utilizando las manos o pies. Todo sistema de aire comprimido se divide en dos partes principales: el suministro y la demanda, en la parte de suministro están los compresores de aire comprimido (Paredes, 2016).

7.5. Tipos de compresores de aire comprimido

Un compresor de aire es el equipo que logra reducir el volumen de aire aumentando su presión por medios físicos y mecánicos para lo cual se utilizan diferentes tecnologías. Actualmente se fabrican varios tipos de equipos para comprimir el aire y las plantas industriales están dominadas por cuatro tipos de maquinaria para dicho propósito y están clasificados en dos grupos: de desplazamiento positivo y de compresión dinámica (Majumdar, 1998).

Los de desplazamiento positivo incluyen a los compresores alternativos o reciprocantes (conocidos como compresores de pistón), los compresores orbitales y los compresores rotativos (tornillo, uña o paletas). Los de compresión dinámica en su proceso se da que el aire se aspira entre los álabes de un rodete

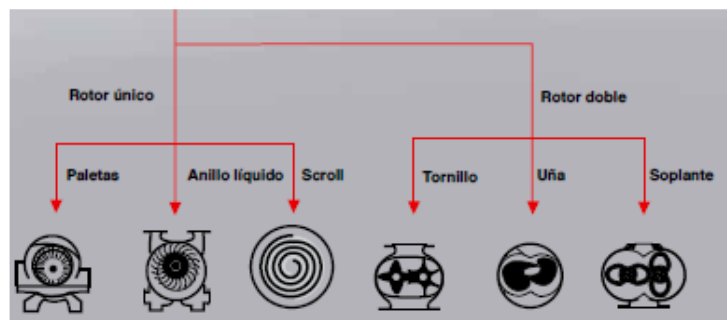
que gira con rapidez, a continuación, el aire se descarga a través de un difusor, donde la energía cinética se aprovecha como presión estática (Atlas Copco, 2011).

La mayoría de los ejemplos de compresión dinámica son de flujo axial o radial. A continuación, se abordará brevemente los compresores rotativos y alternativos, estos han sido los más utilizados en la industria de producción en cuestión.

7.5.1. Compresores rotativos

También se les conoce como compresores giratorios, entre estos están los de rotor único como el compresor de paletas, el de anillo líquido y el de espiral. Los de rotor doble son el de tornillo, el de uña y los sopladores. Se tratará en mayor medida con los compresores de tornillo por ser los más utilizados en la industria bajo estudio, definiendo algunas características importantes, para una mejor referencia sobre el tipo de compresores rotativos véase la figura 2.

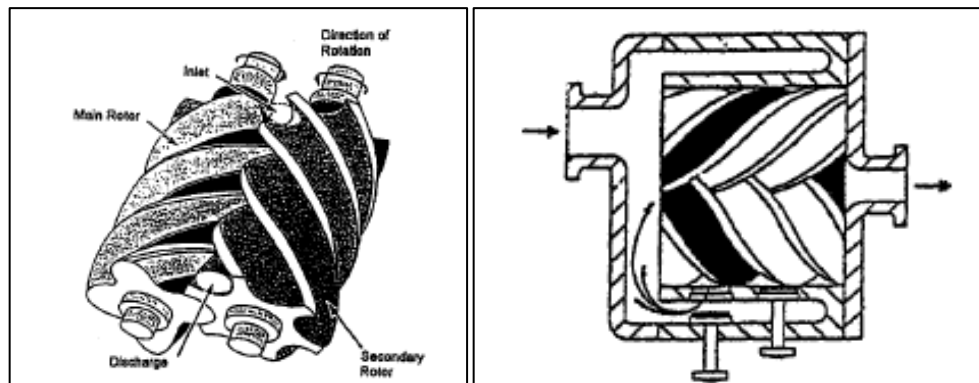
Figura 2. **Imagen sobre los compresores rotativos**



Fuente: Atlas Copco. *Manual del aire comprimido*. Consultado el 29 de Julio de 2020. Recuperado de <https://es.slideshare.net/Sugestive/atlas-copcomanual-del-aire-comprimido-7th-edition>.

El compresor de tornillo ha tenido mayor desarrollo en las últimas décadas, debido a que es ideal para bajas presiones con alta capacidad operativa, donde la presión de ingreso puede ser cercana a cero Pascal (Pa), y una presión máxima de descarga de 2757 kPa (aproximadamente 400 psi). Como se indicó este compresor es de desplazamiento positivo, relativamente mejor al compresor recíprocante (de pistón). Haciendo una breve comparación entre los dos es más sencillo el compresor de tornillo, bajo costo, fácil mantenimiento y muy estable en el suministro de caudal comprimido, larga vida del compresor, compacto entre otras (Hanlon, 2001). En la figura 3 se muestra el perfil de un compresor de tornillo, para tener una mejor comprensión sobre su forma física.

Figura 3. **Rotores helicoidales de un compresor de tornillo y flujo en el sistema**



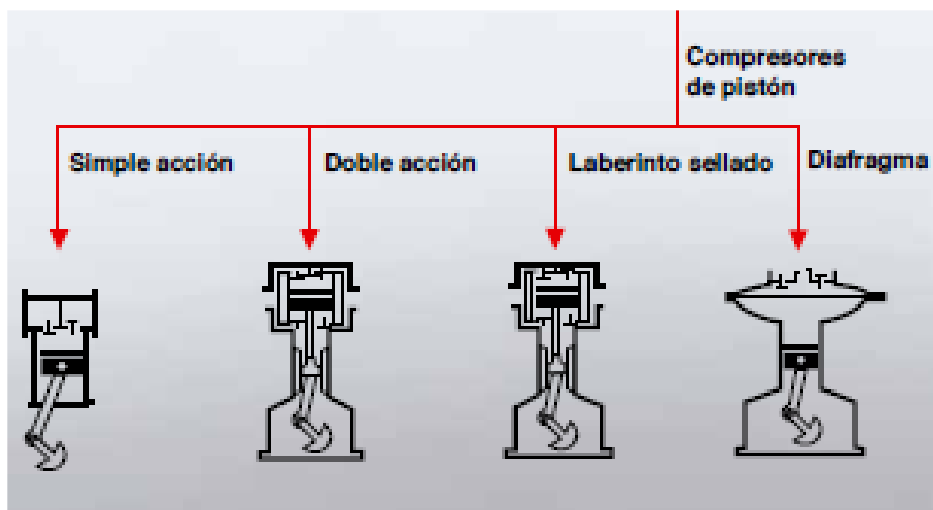
Fuente: Hanlon. (2001). *Compressor Handbook*.

7.5.2. **Compresores alternativos**

En estos compresores el aire se aspira hacia una recámara de compresión, atrapado de forma tal que el volumen en la recámara disminuye gradualmente y el aire se comprime internamente. El compresor más común de este tipo es el

reciprocante o de pistón, los hay de una etapa, de dos etapas, de laberinto sellado y de diafragma, véase la figura 4 para una mejor comprensión(Atlas Copco, 2011). El compresor reciprocante consiste en un pistón que ejerce presión sobre el aire hasta reducir el volumen del mismo dentro de un cilindro, puede ser de simple acción o de doble acción, como se indicó antes, y puede ser diseñado para prácticamente cualquier presión o capacidad, esto hace que sea el más utilizado en la industria de gases.

Figura 4. Tipos de compresores de pistón o reciprocantes



Fuente: Atlas Copco. *Manual del aire comprimido*. Consultado el 29 de Agosto de 2020.
Recuperado de <https://es.slideshare.net/Sugestive/atlas-copcomanual-del-aire-comprimido-7th-edition>.

El compresor reciprocante es más complejo que el de tornillo, puede costar más su mantenimiento, las altas presiones a las que puede llevar el aire o gases, le ha ganado un puesto indispensable en la industria a pesar de sus desventajas.

7.6. La variación de velocidad en los compresores de aire

Debido a que un compresor de aire utilizar un motor eléctrico de corriente alterna para poder dar el movimiento necesario para la compresión del aire, dependiendo del diseño del motor pueden tener diferentes especificaciones de velocidad en revoluciones por minuto. En la actualidad se tiene tanto una velocidad fija, como la opción de utilizar un variador de frecuencia para poder regular dicha velocidad, esto es un motor de velocidad variable.

7.6.1. Velocidad fija

Se refiere a utilizar un motor estándar de velocidad fija, significa que no se le ha instalado ningún variador de frecuencia y que su velocidad está ligada a la ecuación (Chapman, 2014):

$$n = (120 \times f) / p \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- n = velocidad
- f = frecuencia
- p = número de polos

En la práctica esta definición sobre la velocidad de un motor se mantiene para uno de velocidad variable, solo que este último cuenta con un dispositivo que permite variar la frecuencia del mismo.

7.6.2. Velocidad variable

Según la ecuación 2 se puede observar que la velocidad es directamente proporcional a la frecuencia, en el sistema de electrificación dicha frecuencia nominal estándar es 60Hz, y a través de un dispositivo llamado variador de frecuencia o control de frecuencia variable, se puede modificar dicha frecuencia estándar. Estos son controladores de estado sólido para motores, que convierten la frecuencia de entrada constante (60Hz) en la frecuencia de salida deseada para la aplicación, con esto se logra tener frecuencias de salida de una fracción de Hertz (Hz) hasta llegar por encima de la frecuencia nominal (Chapman, 2014).

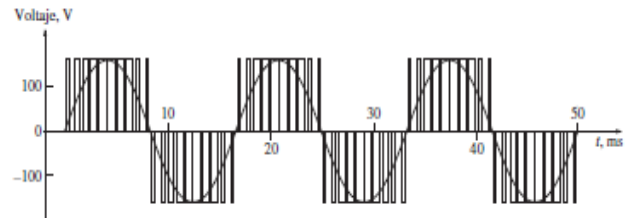
Los controladores de frecuencia variable utilizan electrónica de estado sólido, es un control muy flexible, tiene la ventaja de tener la opción de alimentación eléctrica monofásica o trifásica, con una frecuencia entre 50 y 60Hz, y entre 208 a 230V. la frecuencia se puede hacer variar entre 60 y 120Hz en la salida hacia el motor y el voltaje puede variar entre 0V y el voltaje del motor. Se utiliza la técnica de modulación de amplitud de pulso (PWM por sus siglas en inglés), en donde la frecuencia y el voltaje se pueden controlar de manera independiente por medio de dicha técnica.

A modo de ejemplo véase la figura 5, acerca de un variador de frecuencia y su gráfica de modulación de la amplitud de pulso. Una ventaja de este sistema de control es poder girar a menos revoluciones, teniendo menos flujo y manteniendo la presión constante, consumiendo menos energía, en la actualidad los variadores de frecuencia pueden ser controlados remotamente a través de protocolos de comunicación y esto a su vez permite la monitorización y ajustes del sistema (Luna, 2009).

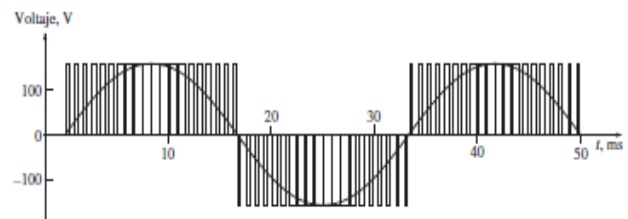
Figura 5. Controladores de frecuencia variable y gráfica de PWM



a) Ilustración de una instalación de variadores de frecuencia.



a)



b)

b) Gráfica de PWM de 60Hz y de 30Hz.

Fuente: Chapman. (2014). *Máquinas eléctricas*.

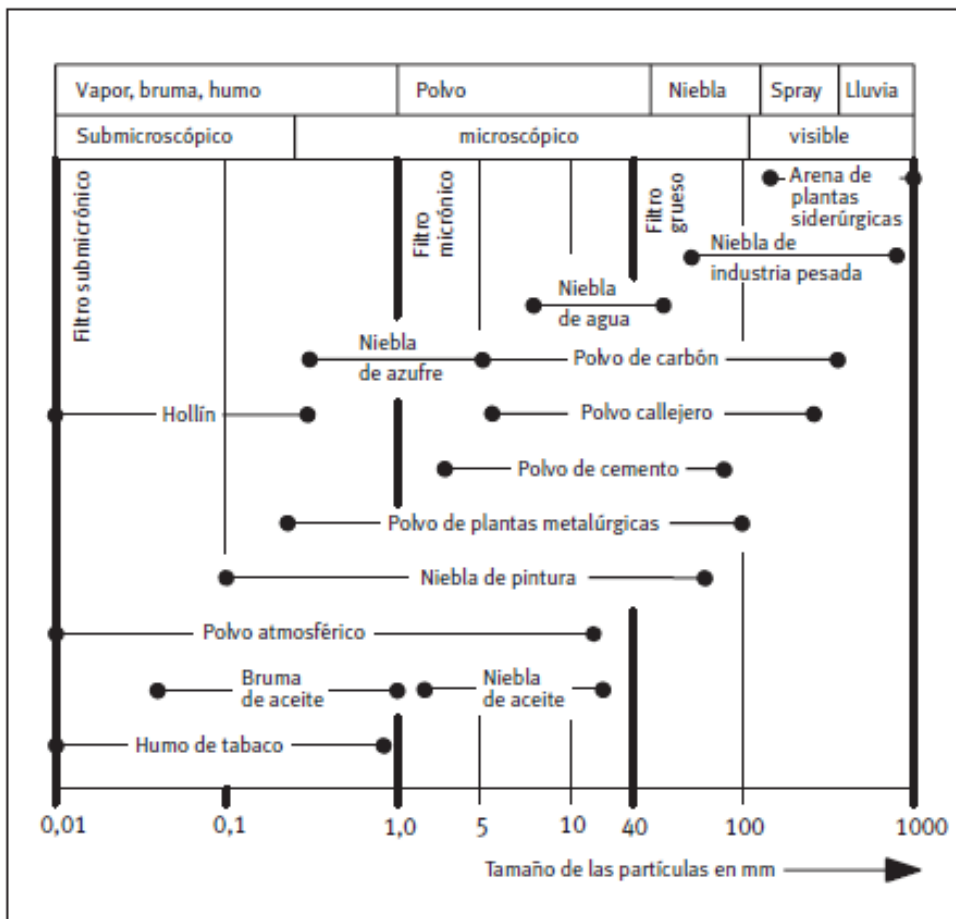
7.7. Calidad del aire comprimido

El aire contiene cierto tipo de partículas suspendidas que pueden disminuir la calidad del aire comprimido, estas partículas se vuelven contaminantes dentro del sistema, adicional durante el proceso mismo de compresión, el compresor concentra los contaminantes y agrega aceite al flujo de aire, así como partículas de desgaste, el poder comprimir aire hasta los 7bar (1 bar = 100 kPa) crea un incremento de hasta 800 % en la concentración de contaminantes (Martín y García, 2014).

Los principales contaminantes del aire son el polvo, el polen, el agua, los microorganismos, el humo, la corrosión de tuberías dependiendo del material, etc. Para cálculos de ingeniería un metro cubico (1 m³) a 25 centígrados puede

contener 23 gramos de agua y 140 millones de partículas, un 80 % con tamaño menor a 5 micras, véase la figura 6 sobre los tipos y tamaños de las partículas (Hesse, 2002). En industrias donde la inocuidad es imprescindible se utiliza tubería de aluminio o incluso tuberías de acero inoxidable, para evitar que la corrosión en la tubería pueda ser un contaminante.

Figura 6. Tipos y tamaños de impurezas comunes en el aire (1 micra =0.001 mm)



Fuente: Hesse. (2002). *Aire comprimido fuente de energía: preparación y distribución.*

En su estado natural el aire contiene impurezas, por tal motivo, es necesario definir la calidad del aire necesario en un proceso productivo, para esto existe una tabla donde consta la calidad de aire comprimido en función de impurezas contenidas (Juárez, 2014).

En la norma ISO 8573-2010 se tiene una tabla para definir la calidad del aire comprimido, véase la tabla II donde se detalla la norma, indicando en el primer número el tamaño de las partículas sólidas, el segundo número es sobre partículas de agua y el tercer número sobre partículas de aceite contenidas en el aire comprimido (Hesse, 2002).

Tabla II. **Cuadro sobre la calidad del aire tomando en cuenta sólidos, agua y aceite**

ISO 8573-1 clase	Partículas sólidas /polvo						Humedad		Aceite
	Numero máx. de partículas por m ³ , Ø en µm				Tamaño partículas en µm	Cant. mg/m ³	Punto de rocío a la presión °C	Agua líquida en g/m ³	mg/m ³
	0.1	0.1-0.5	0.5-1	1 - 5					
0	Según especificaciones del usuario o fabricante, más estricta que la clase 1								
1	-	100	1	0	-	-	-70	-	0.01
2	-	100000	1000	10	-	-	-40	-	0.1
3	-	-	10000	500	-	-	-20	-	1
4	-	-	-	1000	-	-	+3	-	5
5	-	-	-	20000	-	-	+7	-	-
6	-	-	-	-	5	5	+10	-	-
7	-	-	-	-	40	10	-	0.5	-
8	-	-	-	-	-	-	-	5	-
9	-	-	-	-	-	-	-	10	-

Fuente: Juárez. (2014). *Implementación de criterios para selección y clasificación de sistemas de tratamiento de aire comprimido para la industria en Guatemala, en Kaeser compresores.*

Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0802_M.pdf

La finalidad de esta norma es poder establecer los requisitos para determinar la cantidad máxima de contaminantes y los tamaños de partículas que corresponden. Para poder lograr esto se necesita hacer una buena preparación del aire comprimido y esto se logra por medio de equipos que se describen a continuación.

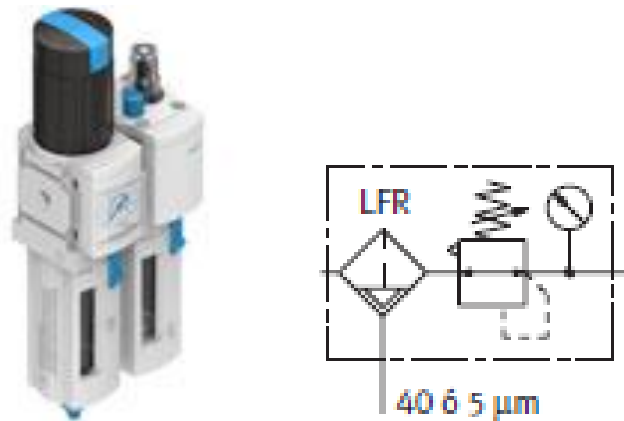
7.7.1. Unidad de mantenimiento

Equipo utilizado para asegurar la presión del aire a través del regulador presión, con esto se evitan pulsaciones en la presión, ya que mantiene estable en todo momento dicha presión de trabajo en los equipos, también contiene un filtro de partículas con su separador ciclónico de humedad y en la mayoría de los casos un lubricador para evitar la fricción interna entre el embolo de un cilindro y sus paredes, así como evitar la fricción en las válvulas neumáticas.

7.7.1.1. Reguladores de presión

El regulador de presión (ver figura 7) es necesario en cualquier instalación de aire comprimido, ya que no todas las aplicaciones trabajan a la presión de distribución en el sistema, por lo general arriba de 600 kPa (6 bar = 88.2 psi), para que los sistemas trabajen por debajo de esta presión, y de esa manera asegurar el suministro adecuado en el equipo de producción.

Figura 7. **Unidad de mantenimiento básica y su simbología neumática**



Fuente: FESTO. *Filtros de aire comprimido*. Consultado el 23 de Julio de 2020. Recuperado de https://www.festo.com/cat/es_es/products_030300.

7.7.1.2. **Filtros micrónicos y submicrónicos**

Las unidades de mantenimiento llevan un filtro de cartucho de forma estándar a 40micras, pudiéndose conectar en serie uno de 5micras, estos dos primeros serían los filtros micrónicos. Sin embargo, dependiendo de la aplicación es necesario tener un filtraje menor a una micra, de ahí se tiene otros dos filtros de partículas que se pueden agregar en serie (otra forma de decirlo es en cascada de filtros), siendo el filtro de una micra y de 0,01 micras los de mayor filtraje. Véase la figura 8 donde se muestra una imagen del filtro y las opciones de filtraje.

Figura 8. **Imagen de un filtro de partículas sólidas y sus posibles filtrajes**



Filtro de 40 micras
Filtro de 5 micras
Filtro de 1 micra
Filtro de 0.01 micras

Fuente: FESTO. *Filtros de aire comprimido*. Consultado el 23 de Julio de 2020.

Recuperado de https://www.festo.com/cat/es_es/products_030300.

7.7.1.3. Lubricación del aire comprimido

La unidad de mantenimiento puede tener un lubricador, este debe montarse a un máximo 5 metros de distancia del punto de utilización, de lo contrario, es posible que la niebla de aceite se deposite antes de llegar al cilindro o válvula que lo necesita, siempre y cuando se trabaje con aire lubricado (Hesse, 2002).

Actualmente algunos fabricantes de cilindros neumáticos ofrecen grasa especial para toda la vida útil de trabajo que se mide en ciclos o en km de recorrido (FESTO, s.f.).

7.7.1.4. Filtros de carbón activado

Hesse (2002) estos filtros son capaces de retener “Partículas a partir de 0,003 micras” (p.135), lo que significa que pueden retener sustancias causantes

de olor y sabor, y en principio el aire limpio no tiene sabor, ni olor. Los filtros de carbón activo también se llaman filtros submicrónicos (Luna, 2009). A continuación, una imagen ilustrativa de un filtro de carbón activado para instalarse en tuberías, pueden ir después de la generación del aire comprimido o bien justo antes de la utilización del aire, dependiendo del criterio para la instalación, ver figura 9.

Figura 9. **Imagen ilustrativa de un filtro de carbón activado**



Fuente: Luna. (2009). *Generación de aire comprimido*.

7.7.1.5. Separadores de humedad

El separador de agua, literalmente ayuda a separar las gotas de agua contenidas en el aire comprimido, este filtro tiene un principio llamado ciclónico, donde el aire pasa por una chapa que lo obliga a efectuar un movimiento rotativo, para que las fuerzas centrífugas ayuden a separar el agua (Hesse, 2002). Existen actualmente de purga manual y purga automática, el primero termina llenándose y es necesario purgarlo, así como efectuar los trabajos de mantenimiento en concordancia con las recomendaciones de los fabricantes. Si se tienen dudas, es preferible utilizar un separador automático. Para conseguir aire comprimido de

mayor calidad, la filtración de las sustancias sólidas debe hacerse en cascada, esto es colocar el separador de agua, después un filtro de 40micras, después uno de 5micras, hasta lograr la filtración necesaria.

7.7.1.6. Unidad de lubricación

Este apartado es para hacer notar el hecho de que en sistemas donde el aire tiene contacto con alimentos o es parte del proceso productivo, este debe ser inocuo, por lo tanto, no es necesaria una unidad de lubricación, por el contrario, es vital en equipos de vibración neumática que normalmente se usan en silos y transporte de polvos o granos, para evitar lo que se llama agujeros de ratas o el apelmazamiento del producto.

7.8. Secadores del aire comprimido

El aire al comprimirse contiene partículas de humedad, esto es vapor de agua. “Si se piensa en una esponja que contiene humedad y esta se exprime, se logran obtener las gotas de agua contenidas en su interior, al comprimir el aire se logra concentrar estas gotas de agua contenidas en el mismo” (Atlas Copco, 2019, p. 12). Dicha humedad no es conveniente y solo perjudica en mayor cantidad a los sistemas neumáticos de ahí surge la necesidad de utilizar secadores de aire, en principio hay 3 tecnologías que son las más utilizadas: secador refrigerado, por adsorción y por material desecante.

7.8.1. Secado por refrigeración

Cuando se reduce la presión del aire comprimido hasta alcanzar la presión atmosférica, es decir, el aire aumenta su volumen hasta el punto de llegar a su volumen inicial, se produce condensado. 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 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. En muchos casos es suficiente recurrir al método de refrigeración. Donde la temperatura del aire disminuirá por efecto de un agente refrigerante, así se forma condensado y disminuye el contenido de agua del aire (Hesse, 2002).

7.8.2. Secado por adsorción

En caso de emplear un secador por adsorción, debe utilizarse un filtro de 1 micra con el fin de prolongar su duración. Se debe definir si es necesaria la lubricación, ya que el aceite disminuiría considerablemente la duración del agente secante y la temperatura de entrada debería ser inferior a 35 °C. En el secado por absorción, una sustancia química atrae la humedad que termina disolviéndose en ella. La sustancia química es una solución salina a base de NaCl (Luna, 2009).

7.8.3. Secado por membrana

Los secadores de membrana están compuestos por un haz de fibras huecas permeables al vapor, donde el circula aire seco que no está sometido a presión. El secado se produce a raíz de la diferencia parcial de presión entre el aire húmedo en el interior de las fibras huecas y el flujo en sentido contrario del aire seco. El sistema procura crear un equilibrio entre la concentración de vapor de agua en ambos lados de la membrana (Hesse, 2002).

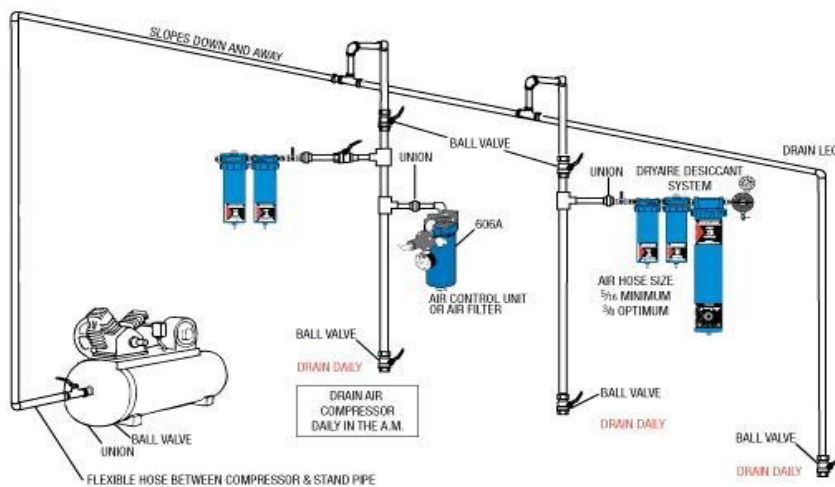
7.9. Tipos de redes en sistemas de aire comprimido

Atlas Copco (2011) La red de aire comprimido es en otras palabras la topología de la red y hay dos: la red de lazo abierto y la red de lazo cerrado, cada una con sus características.

7.9.1. Red de lazo abierto

La red de lazo abierto es la más económica de instalar, muy utilizada en talleres pequeños. Necesita una pendiente de 1 grado bajo la horizontal, para evitar que el condensado dañe la tubería. Cada 30.5 metros debe existir una drenado de la tubería y un aumento de altura para los próximos 30.5 metros de ser necesario. Véase la figura 10, donde se observan las bajadas del aire por medio de codos, esto para evitar que el condensado contenido en la tubería pueda llegar a los equipos que utilizan el aire (Majumdar, 1998).

Figura 10. Esquema de lazo abierto para aire comprimido

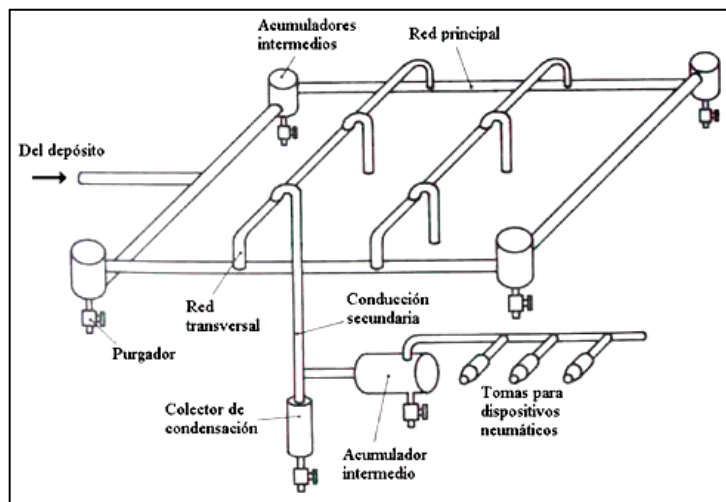


Fuente: Méndez. (2009). *Curso de neumática básica*.

7.9.2. Red de lazo cerrado

Esta es la red más recomendada en la instalación de aire comprimido, porque es donde se da la menor caída de presión, y pérdidas por accesorios y tuberías. Puede ocupar varias naves industriales o bodegas, con la menor pérdida de presión. Por lo general estas cuentan con varios compresores debido a su tamaño, véase la figura 11, actualmente los sistemas de tuberías han mejorado, al igual que las filtraciones y el tratamiento del aire, aun así se considera necesario utilizar codos en las bajadas de aire.

Figura 11. Imagen ilustrativa de una red de lazo cerrado



Fuente: Méndez. (2009). *Curso de neumática básica*.

7.10. Tecnologías de medición para el análisis de consumos y fugas

Es muy importante el avance en las tecnologías de medición e instrumentación, ya que esto permite hacer eficiente el sistema a medir. Para este propósito existen diversas marcas y fabricantes de equipos, algunos cuentan ya

con una estructura enfocada en industria 4.0, lo cual involucra un nivel de comunicación entre los diversos equipos para monitoreo y visualizaciones de estado.

7.10.1. Consumo de aire comprimido

El consumo de aire comprimido en un proceso productivo solo puede conocerse, medirse y registrarse a través de equipo especializado; para ello se debe definir dos conceptos, como lo es el flujo volumétrico y el flujo másico, este tipo de mediciones se hace con sensores especializados para la medición de flujo, ver figura 12.

Figura 12. **Ilustración de un módulo de eficiencia energética para medición continua**



Fuente: FESTO. *Filtros de aire comprimido*. Consultado el 23 de Julio de 2020.

Recuperado de https://www.festo.com/cat/es_es/products_030300.

7.10.1.1. Flujo volumétrico

Según Cengel (2014), es “El volumen del fluido que pasa a través de una sección transversal de tubería por unidad de tiempo” (p. 392), denotado por una

Q en algunos textos y en otros como una V (cursiva). Este esta medido en Litros/minuto (L/m), medida que nos servirá más adelante para poder definir el consumo del aire, los desperdicios y otras mediciones.

7.10.1.2. Flujo másico

Cengel (2014) define así a “La cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo” y se denota mediante \dot{m} (p. 220). El punto sobre un símbolo se usa para indicar la rapidez de cambio respecto al tiempo, y existe la ecuación que relaciona el flujo volumétrico con el flujo másico:

$$\dot{m} = \rho V \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- \dot{m} = flujo másico
- ρ = densidad del fluido
- V = caudal volumétrico

7.10.1.3. Puntos de medición para los consumos

Para poder hacer las mediciones en la instalación se debe colocar el dispositivo de medición en serie con el equipo que utiliza el aire comprimido, en la bajada o toma de aire. Esto puede ser antes de la unidad de mantenimiento de la máquina seleccionada, ahí se puede medir y registrar el caudal instantáneo de aire comprimido utilizado, se pueden hacer mediciones programadas para un posterior análisis y evaluación, con el fin de mantener la eficiencia en el uso del aire comprimido.

El equipo de medición puede entregar a través de una conexión a una computadora datos en una hoja de calculo electrónica, lo cual permite el análisis de los consumos, se deben tener los horarios de los mismos para definir acciones puntuales para la optimización de la energía. En este trabajo se define al equipo como un módulo de medición de consumos y detección de fugas, ya que monitorea el consumo de aire comprimido y también cuenta con la conexión para la recolección de datos a una computadora y acompañado de un equipo ultrasónico indica donde hay una fuga.

7.11. Fugas del aire comprimido

Para conocer el total de aire desperdiciado en fugas existentes, se debe tomar los datos registrados por el módulo de consumos cuando el equipo este sin producir, se deben abrir las válvulas de alimentación hacia los equipos, y la instalación debe estar presurizada. En estas condiciones el valor indicado por el módulo de consumos, reflejará el caudal consumido por Fugas, cuando el equipo está sin carga productiva y arroja un consumo, esto indica claramente que hay fugas y la energía se desperdicia hacia el medio ambiente, ya que este aire no está siendo productivo.

La cantidad de pérdidas de energía en una planta industrial debido a las fugas puede producir una eficiencia pobre, al punto de gastar mucho dinero, si no se corrigen las fugas. Hesse (2002) “Muchas instalaciones en funcionamiento tienen un coeficiente de fugas entre el 20 y 25 por ciento” (p. 29), esto sobre la capacidad de generación instalada.

7.11.1. Mediciones por ultrasonido

El aire comprimido al fugarse, genera un sonido a veces inaudible para el ser humano, aun así, cuando la fuga es grande, se identifica fácilmente. Cuando esta fuga no es fácil de detectar, se utiliza un sensor de ultrasonido, con este es posible detectar el sonido y emitir una indicación sonora que es audible, para poder identificar donde está la fuga. El equipo cuenta con auriculares, con los cuales es posible identificar en lugares donde debido al proceso hay mucho ruido. Este equipo básicamente orienta a la persona que realiza las mediciones. De esta manera se localiza mejor y muy rápidamente cualquier fuga en uniones, roscas, tuberías, válvulas o cilindros neumáticos.

7.11.1.1. Clasificación de fugas

Una fuga no es más que la pérdida de aire comprimido, ya que el sistema debería ser hermético, esto significa que ha perdido dicha condición. En ese punto donde no hay hermeticidad, el aire comprimido se escapa a alta velocidad debido a la presión interna del sistema; las pérdidas de aire pueden ser considerables y ocasionar un alto costo de energía, tal como se muestra en la tabla 3. Si las fugas son grandes, generar aire comprimido resulta ser bastante costoso, y es de resaltar que las fugas al principio son pequeñas y si no se identifican pueden llegar a ser mayores.

Tabla III. **Medidas de tamaño de orificio y su pérdida de flujo y energía**

Diámetro del orificio de la fuga en mm	Pérdida de aire comprimido (6 bar) en l/s	Pérdida de energía en kW
1	1,3	0,3
3	11,1	3,1
5	31,0	8,3

Fuente: Hesse. (2002). *Aire comprimido fuente de energía: preparación y distribución.*

7.11.2. Mediciones a través de caudales con equipo en reposo y en operación

Como se mencionó para poder efectuar el consumo se debe tener el equipo a medir en operación, con toda la carga de trabajo, para posteriormente hacer trabajar el equipo sin producción, y de existir consumo de aire, se puede primero identificar el potencial de eficiencia a mejorar. Segundo el consumo que representan las fugas, con el medidor ultrasónico se puede identificar el lugar preciso de estas fugas.

7.11.3. Puntos de medición de fugas

Básicamente se debe utiliza el equipo ultrasónico a lo largo de las tuberías, en las conexiones de tuberías, válvulas y cilindros, hacer un recorrido con el equipo ultrasónico, e ir marcando los puntos donde se emite sonido con etiquetas, a fin de identificar para posteriormente hacer la solicitud de materiales y planificar el cambio o reparaciones necesarias. Otro método de medición utilizado es a

través de la observación en un depósito de aire comprimido. Acá para determinar la cantidad de aire que se pierde por la fuga, se aplica la fórmula siguiente:

$$VL = (VB \times (Pe - Pf))/t \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- VL = cantidad de aire perdido por la fuga, expresada en l/min.
- VB = capacidad del depósito de aire comprimido en litros.
- Po = presión inicial en el depósito en bar.
- Pf = presión final en el depósito en bar.
- t = duración de la operación de medición en min.

7.12. Medición de la presión y detección de caídas de presión

La medición de la presión es necesaria para definir que el diseño del sistema de aire comprimido tiene una caída mínima de presión. Otro aspecto muy importante esta definir si hay fugas, ya que una vez revisado el diseño e inspeccionado que no existan deficiencias en el mismo, las pérdidas de presión también son indicador de fugas en el sistema. Se considera aceptable que la caída de presión máxima en una red de aire comprimido debe ser menor al 15 % de la presión de trabajo (Luna, 2009).

7.12.1. Mediciones discretas

Esto es tomar un punto a medir, colocar el instrumento de presión y de forma puntual hacer la medida, después pasar a otro punto de medición y hacer lo mismo, se dice que es discreta ya que no es una medición continua en el tiempo.

Sin embargo, puede hacerse una gráfica con los datos para determinar una tendencia o el correcto funcionamiento del equipo.

7.12.2. Mediciones continuas

A diferencia de la anterior esta medición puede ser continua en el tiempo, en este tipo de medición se cuenta con un registro de datos, que debido al número de muestras que toma del equipo, se genera una gráfica en tiempo real sobre la presión, si hay o no caídas puede quedar grabado en la memoria del instrumento de presión (cuando existe adquisición de datos).

7.12.3. Puntos de medición de la presión

Los dos puntos principales serian: primero a la salida del compresor, como una medida para corroborar que la presión parametrizada de salida sea la correcta, segundo en el punto de utilización más alejado del sistema de compresión. Si el sistema es un lazo abierto siempre existirá una mayor caída de presión, en comparación a un lazo cerrado, donde uno de los objetivos principales del diseño es que no hay caída de presión, sin embargo, al detectar alguna caída, probablemente sea por fugas en el sistema.

7.13. Análisis de consumos

La medición a través de un módulo de consumos indica el consumo de aire comprimido en un equipo en particular. Sin embargo, el método convencional (visto en la sección 2.2.3) no es la mejor opción para este fin Hesse (2002), ya que la pérdida de presión es una magnitud “secundaria” en este caso, y se acopla más en el análisis del diseño. Para obtener mejores resultados, el módulo de

consumos utiliza un medidor térmico de caudal, que también observan la presión en el sistema, pues el mismo da una medición en litros normalizados.

7.13.1. Medición inicial para determinar línea base energética

El termino de línea base de eficiencia energética definiendo es la línea base energética. También se conoce como consumo teórico. Lo que llamamos línea base energética o línea base de consumo energético no es más que una medida de consumo teórico ideal. Así que es necesario hacer mediciones iniciales para determinar los consumos de energía y posteriormente el análisis (Mariani y Reis, 2017).

7.13.1.1. Consumos con equipo en operación

Es necesario realizar las mediciones con el equipo en operación, para poder establecer la línea base, se puede hacer únicamente con bases teóricas, y comparar si está dentro del cálculo, si esto está fuera de cálculo, entonces existe un problema serio de fugas y/o desperdicios del aire comprimido.

7.13.1.2. Consumos con equipo en reposo

El consumo de los equipos en reposo como se mencionó antes permite definir la cantidad de energía desperdiciada en fugas. Estas mediciones permitirán establecer un antes y un después en la mejora del sistema.

7.13.1.3. Cuantificación de las fugas

Por medio de las mediciones tanto en consumos, como en la identificación de fugas se puede definir el costo energético y económico que representan cada fuga ya definida.

7.14. Medición inicial con equipo ultrasónico para determinar ubicación de fugas

Es muy importante poder determinar las fugas en un sistema de aire comprimido, esto ayuda a evitar pérdidas de energía, aportando a mantener la eficiencia energética del sistema y ayuda a cuantificar los costes por fugas de existir, para ello se hace necesario utilizar un equipo de ultrasonido.

7.14.1. Identificación de las fugas en el sistema

El equipo primero se conecta con la alimentación de aire comprimido abierta hacia la máquina, sin producción en primera instancia, por seguridad, de esta manera se evitan riesgos de daño, ya que los con mecanismo en movimiento no afectan la producción. El elemento sensor emite un sonido y enciende una luz indicadora dependiendo del tamaño de la fuga detectada, mientras mayor sea el sonido que emite, mayor será la fuga.

7.14.1.1. Corrección de las fugas

Al momento realizar la medición con el equipo se puede identificar con una etiqueta adhesiva o sujeta con cincho plástico, con ello se puede realizar un inventario de fugas, a fin de planificar con el equipo de producción y mantenimiento el momento del cambio, puesto que en ocasiones será necesario

el paro completo del equipo, dependiendo del lugar donde se ubique la fuga, por horas o incluso más tiempo.

7.15. Medición inicial de la caída de presión en puntos críticos de la planta

La presión como se mencionó antes puede tener una caída aceptable si es menor al 15 % de la presión total en el sistema a la salida del compresor (Luna, 2009). En la mayor parte de la industria se ha establecido como un estándar trabajar a 600 kPa (6 Bar de presión), y se considera muy bien que el sistema de compresión entregue una presión de 689 kPa (6.89 Bar aproximadamente), esto es un 14.8 %, un dato acorde a lo que podría ser una caída de presión en un diseño aceptable para cubrir las pérdidas de presión debidas al mismo sistema.

7.15.1. Caídas de presión debidas al diseño

Las caídas de presión en la red de aire pueden ser causadas de acuerdo a Luna (2009):

- Diámetros mal seleccionados (diámetro menor al requerido).
- Cambio de diámetro en la tubería sin justificación.
- Conexiones y racores con fugas.
- Turbulencias en el flujo de aire provocadas en el sistema.
- Sección de tubería muy larga en una red de lazo abierto.
- Fricción en la superficie interior de la tubería, más cuando la tubería es demasiado vieja y no tiene ningún tratamiento contra la corrosión.

7.15.2. Caídas de presión debidas a los accesorios y tubería

Las caídas de presión reducen el desempeño de herramientas y equipos neumáticos, por lo que se incrementan los costos del aire comprimido y los costos de producción. En la tabla IV se observa un ejemplo acerca de las pérdidas que debe tener un sistema de aire comprimido.

Tabla IV. **Ejemplo sobre pérdidas de presión en un sistema de aire comprimido**

1	Línea de alimentación	0.435 psi	} 1.45 psi
2	Red de distribución	0.435 psi	
3	Bajadas	0.58 psi	
4	Secador refrigerativo	2.9 psi	
5	Filtro/Regulador/Lubricador y mangueras	7.25 psi	
	Caída máxima (sumatoria)	11.6 psi	
	Diferencia de control	2.9 psi	
		14.5 psi	
	Presión máxima en el compresor	101.5 psi	
	Presión en punto de uso	87 psi	
	Caída de presión	14.5 psi	

Fuente: Luna. (2009). *Generación de aire comprimido*.

7.15.3. Las caídas de presión y la perdida de eficiencia

Antes se indicó que la presión normal de trabajo es de 600 kPa (esto 90 psi o 6 Bar),y que siempre se acostumbra a compensar la caída de presión. Por ejemplo: una caída de presión de 13.8kPa (2psi) es más significativa en pérdidas de energía; por ejemplo: a 405 kPa (4 Bar o 58 psi), que en un sistema de donde se utilicen los 600 kpa (6 Bar o 90 psi) y se compense la presión generando una mayor a la salida del compresor 689 kPa (100 psi) (Atlas Copco, 2011).

7.16. Metodología ISO 50001 aplicada en eficiencia energética al sistema de aire comprimido

Esta se aplica como un sistema de gestión energética, la metodología usa las bases de mejora continua ya probada por las normas ISO, en la calidad y en los procesos productivos. Se debe desarrollar dentro del sistema de gestión una organización dedicada para desarrollar y llevar a cabo una política energética, también, gestionar aquellos elementos de clave en sus actividades, productos o servicios que hacen uso de la energía.

7.16.1. El sistema de gestión de la energía Norma ISO 50001

En esta norma se definen los requisitos necesarios para un sistema de gestión energética, el principal consiste en realizar mejoras continuas en el uso de la energía, así como sistematizar la gestión sobre la eficiencia energética dentro cualquier industria que la adopte.

La norma ISO 50001:2011 fue concebida de tal forma que es posible su integración en otros sistemas de gestión (por ejemplo ISO 9001, ISO 14001, entre otros) que pueden estar presentes en la organización, independientemente de si se está en proceso de certificarse bajo esta norma o ya se cuenta con alguna de las normas mencionadas, el proceso que se lleva a cabo bajo esta metodología puede ser aplicado para mejorar cualquier procesos de gestión energética (AChEE, 2012).

7.16.2. Términos y definiciones Norma ISO 50001

Los principales términos y definiciones de la norma ISO 50001, se basan en el ciclo de mejora continua y consiste en:

- Planificar: se debe establecer primero el comportamiento energético de una organización, a fin de establecer control y objetivos que permitan mejorar el desempeño energético al realizar una planificación.
- Hacer: busca poner en práctica procedimientos, para sistematizarlos, a fin de mejorar la eficiencia energética.
- Verificar: realizar un monitoreo de los procesos y productos en base a políticas establecidas previamente, se busca obtener las características claves de las operaciones y reportar los resultados para la toma de decisiones.
- Actuar: llevar a la práctica las acciones definidas en la toma de decisiones, a fin de mejorar continuamente la eficiencia energética (Isotools, s.f.).

7.17. Política energética

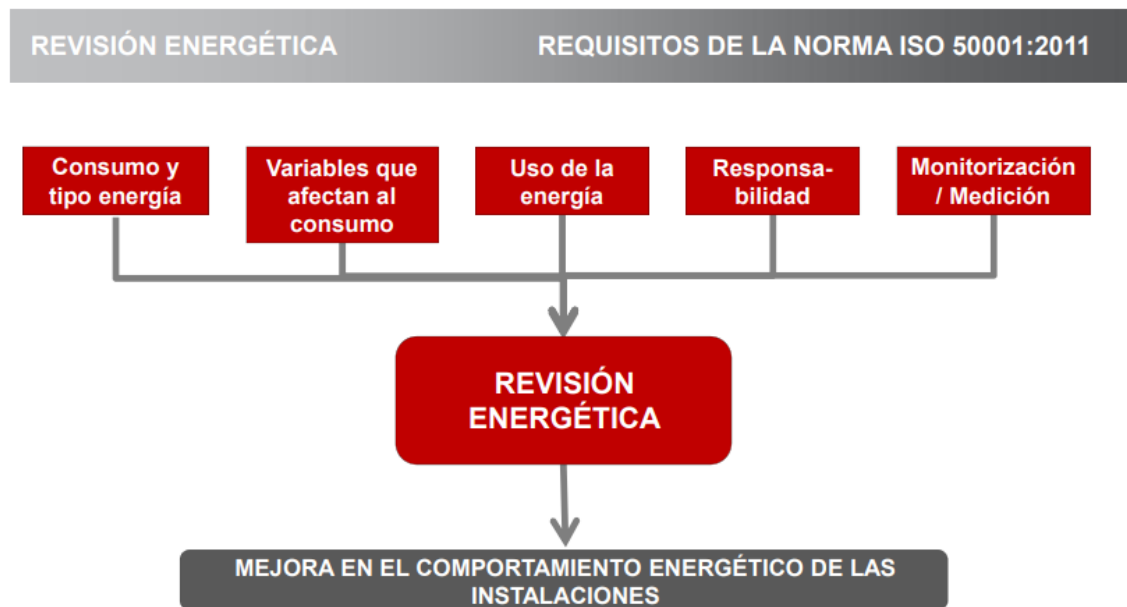
Esta busca obtener el compromiso de la dirección general de la empresa, en busca de una mejora continua al tratar con el uso de la energía, estableciendo los objetivos, acordes a los límites establecidos por requisitos legales que deba cumplir la empresa, así como alinearse a la mejora en temas de gestión energética.

7.18. Revisión energética

A través del monitoreo establecido, se logra el seguimiento, la medición y el análisis del sistema energético; se debe definir una evaluación del cumplimiento de los requisitos legales o técnicos. Llevar a cabo una auditoría energética interna, definiendo las no conformidades encontradas, para poder tomar las

acciones correctivas o preventivas. En este punto se debe contar con un registro sobre los avances y mejoras en la eficiencia energética, y de esta manera poder establecer un plan de acción. Por último, se debe definir una próxima revisión donde deban sumarse para tal actividad los recursos que sean necesarios, en la figura 13 se observa un diagrama sobre la verificación pertinente bajo la norma ISO.

Figura 13. **Punto para tomar en cuenta para la revisión energética**



Fuente: Morell. *ISO 50001: Sistema de gestión de la energía: Requisitos ISO 50001:2011. Planificación*. Consultado el 23 de Julio de 2020. Recuperado de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia_energetica/2planificacionenergetica.pdf.

7.19. Planificación energética

La planificación debe ser acorde a la política energética. Es necesario conocer de forma real los consumos energéticos, los factores que afectan dichos consumos, y plantearse siempre realizar un diagnóstico energético, a fin de mejorar el uso de la energía, y el establecimiento de la línea de base energética y así como los indicadores de desempeño, además de las normas.

7.20. Línea base energética

La entrada en vigencia de la norma ISO 50001 ha llevado al sector empresarial a una rápida implementación en los procesos productivos o de servicios. Este proceso se ha visto limitado en ocasiones por las dificultades en la definición adecuada de la línea base energética.

7.21. Seguimiento medición y análisis

La documentación de las operaciones es clave para el seguimiento, medición y análisis; debe asegurarse la competencia del personal operativo, su capacitación en el manejo de información y conceptos energéticos importantes. También debe asegurarse una buena comunicación sobre los resultados y plan de acción, así como establecer el control operacional en el diseño de las instalaciones, y debe analizarse la eficiencia energética de equipos nuevos y de un nuevo servicio de energía si fuese necesario, uno con menor impacto sobre el medio ambiente.

7.21.1. Auditorías internas de la eficiencia energética

La auditoría es un procedimiento que arroja información confiable y objetiva sobre el consumo de energía, ya sea eléctrica, neumática, hidráulica, térmica, y otros tipos de energía en una empresa o industria, para poder detectar qué factores afectan a dicho consumo. Lo importante es entender como se está empleando la energía y si es desperdiciada en algún punto. Con ello se logra establecer y organizar las posibles mejoras en la eficiencia energética y en el ahorro energético.

Una auditoría incluye por lo tanto un estudio completo tanto de los factores de tipo técnico como de los de tipo económico que influyen sobre el consumo de todas aquellas instalaciones o equipos que consumen energía dentro las instalaciones objeto del estudio (OVACEN, s.f.)

Esto se basa en tener un historial de las mediciones realizadas, acciones correctivas y el seguimiento apropiado a las metas trazadas en la planificación energética realizada por la gerencia, en conformidad con las políticas establecidas. El objetivo de establecer esta metodología para la eficiencia energética es, entre otras:

- Reducción en los costes de energía en la planta de producción.
- Reducción del impacto al medio ambiente.
- Mejor uso de los activos existentes que consumen energía.
- Crea transparencia y ayuda en la comunicación sobre la gestión de los recursos energéticos.
- Promueve mejoras en las prácticas sobre administración de la energía y refuerza el buen comportamiento en torno a la gestión de energía.

- Establece un marco de referencia para mejorar la eficiencia energética en toda la cadena de suministros.
- Contribuye en facilitar la gestión energética y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aire comprimido

1.1.1. Propiedades de aire comprimido

1.1.1.1. El aire comprimido es energía

1.1.2. Unidades de medición

1.1.3. Aplicaciones en la industria

1.1.4. Tipos de compresores de aire comprimido

1.1.4.1. Compresores rotativos

1.1.4.2. Compresores alternativos

1.1.5. La variación de velocidad en los compresores de aire

1.1.5.1. Velocidad fija

1.1.5.2. Velocidad variable

1.2. Calidad del aire comprimido

1.2.1. Unidad de mantenimiento

1.2.1.1. Reguladores de presión

- 1.2.1.2. Filtros micrónicos y submicrónicos
 - 1.2.1.3. Lubricación del aire comprimido
 - 1.2.1.4. Filtros de carbón activado
 - 1.2.1.5. Separadores de humedad
 - 1.2.1.6. Unidad de lubricación
 - 1.2.2. Secadores del aire comprimido
 - 1.2.2.1. Secado por refrigeración
 - 1.2.2.2. Secado por adsorción
 - 1.2.2.3. Secado por desecante
 - 1.2.3. Tipos de redes en sistemas de aire comprimido
 - 1.2.3.1. Red de lazo abierto
 - 1.2.3.2. Red de lazo cerrado
- 1.3. Tecnologías de medición para el análisis de consumos y fugas
 - 1.3.1. Consumo de aire comprimido
 - 1.3.1.1. Flujo volumétrico
 - 1.3.1.2. Flujo másico
 - 1.3.1.3. Puntos de medición para los consumos
 - 1.3.2. Fugas del aire comprimido
 - 1.3.2.1. Mediciones por ultrasonido
 - 1.3.2.2. Clasificación de fugas
 - 1.3.2.3. Mediciones a través de caudales con equipo en reposo y en operación.
 - 1.3.2.4. Puntos de medición de fugas
 - 1.3.3. Medición de la presión y detección de caídas de presión
 - 1.3.3.1. Mediciones discretas
 - 1.3.3.2. Mediciones continuas
 - 1.3.3.3. Puntos de medición de la presión
- 1.4. Análisis de consumos
 - 1.4.1. Medición inicial para determinar línea base energética

- 1.4.1.1. Consumos con equipo en operación
 - 1.4.1.2. Consumos con equipo en reposo
 - 1.4.1.3. Cuantificación de las fugas
 - 1.4.2. Medición inicial con equipo ultrasónico para determinar ubicación de fugas
 - 1.4.2.1. Identificación de las fugas en el sistema
 - 1.4.2.2. Corrección de las fugas
 - 1.4.3. Medición inicial de la caída de presión en puntos críticos de la planta
 - 1.4.3.1. Caídas de presión debidas al diseño
 - 1.4.3.2. Caídas de presión debidas a los accesorios y tubería
 - 1.4.3.3. Las caídas de presión y la perdida de eficiencia
- 1.5. Metodología ISO 50001 para la eficiencia energética aplicada al sistema de aire comprimido
 - 1.5.2. Sistemas de gestión de la energía Norma ISO 50001
 - 1.5.3. Términos y definiciones Norma ISO 50001
 - 1.5.4. Política energética
 - 1.5.5. Revisión energética
 - 1.5.6. Planificación energética
 - 1.5.7. Línea base energética
 - 1.5.8. Seguimiento medición y análisis
 - 1.5.8.1. Auditorías internas de la eficiencia energética

2. RECOLECCIÓN DE DATOS Y MEDICIONES DE CAUDAL Y FUGAS

3. SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA
4. ESTIMACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN Y PERDIDA DE EFICIENCIA
5. DETERMINACIÓN DEL AHORRO EN COSTO ENERGÉTICO Y LA MEJORA EN EFICIENCIA AL ESTABLECER LAS CORRECCIONES NECESARIAS
6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En este se determinará las mejoras que pueden efectuarse en la eficiencia energética en la utilización del aire comprimido dentro en una industria de envasado, a través de la implementación de un módulo de medición de consumos y detección de fugas, así como el costo que esto representa para dicha industria.

9.2. Definición de variables

A continuación, se definen las variables que se utilizan en el presente estudio, véase la tabla V, donde se definen las variables cuantitativas a tomar en cuenta.

Tabla V. **Definición de variables**

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Caudal	También conocido como flujo volumétrico, es el volumen de aire que fluye por una sección transversal, esto es en una tubería en un tiempo determinado. Cengel y Boles (2014), en otras palabras, la velocidad a la que fluye un volumen determinado de aire.	Se medirá el caudal de aire que ingresa a la unidad de mantenimiento de aire comprimido de cada equipo, o en cada suministro de aire en la línea de producción. Se mide en L/min.
Caudal másico	Es la razón de masa que representa el aire comprimido, fluyendo a través de una tubería, en un determinado tiempo (Wark y Richards, 2001).	El equipo puede brindar la medición de flujo másico, al tener sensor de flujo, sensor de temperatura y presión incluidas en la medición. Se mide en Kg/min.

Continuación tabla V.

Presión	Se define a la presión como la fuerza normal por unidad de área que actúa sobre la frontera del sistema (Wark y Richards, 2001).	Se tomará de forma puntual la medición dada por el controlador de compresores, el cual cuenta con medición de la presión de salida del compresor. Las dimensionales más comunes son Bar (psi).
Orificio de fuga	Diámetro del orificio por el que se fuga determinado volumen de aire a cierta presión (Paredes, 2016).	Por medio de medición ultrasónica se determina un tamaño estimado del orificio que representa la fuga de aire, que termina siendo un desperdicio y pérdida de eficiencia. Dimensional de medición en mm ² .
Energía kWh	Es una unidad física que se utiliza para indicar la capacidad de realizar un trabajo, será esta la definición a utilizar (Michinel y Martínez, 1994).	La estimación se hace a través de mediciones de consumo, y se establece la relación entre potencia de generación respecto de los L/min generados a través de los compresores y el tiempo de operación durante una hora.
Reducción energética	Se refiere a la disminución de consumo energético, no por ahorro, sino más bien al incrementar la eficiencia energética (Machado, 2010).	Se estima la energía que representan las fugas o desperdicios de energía al hacer uso inadecuado del aire comprimido, las cuales se cuantifican en un mes de operación. Dimensionales en kWh/mes.
Consumo aire	Es una forma de medir el caudal en forma concreta bajo condiciones normalizadas, hay dos normas, para este caso se utilizará la norma ISO 6358 (FESTO, s.f.).	La medición que se realiza con el medidor de consumos arroja mediciones en L/min normalizados, esto a una temperatura de 20 centígrados, humedad del 65 % y 1 Bar presión absoluta.
Caída de presión	Se refiere a la pérdida de presión a causa de fricción en tuberías, accesorios y demás elementos que componen la red de distribución de aire comprimido.	Se obtiene la caída de presión a través de hacer mediciones puntuales en los extremos o tomas de aire comprimido más alejadas del compresor, y se compara con la lectura del compresor para determinar la caída en el sistema. Dimensionales en Bar (psi).

Continuación tabla V.

Costo de fugas	Dinero desembolsado en factura de servicio eléctrico debido a desperdicios en fugas o uso inadecuado del aire.	Se establece el costo a través de las mediciones y la factura de energía que representa la generación de aire comprimido. Dimensionales en Q/kWh.
Eficiencia energética	La eficiencia energética para la industria se puede definir como la razón entre la cantidad de un producido y la cantidad de energía gastada en su producción (Narvaéz, 2018).	Viene determinada por la razón entre la energía utilizada por unidades producidas, se obtiene de forma indirecta a través de los datos recopilados. Dimensionales en kWh/unidad producida.

Fuente: elaboración propia.

9.3. Fases del estudio

A continuación, se describen las fases de estudio de la investigación.

9.3.1. Fase 1: exploración bibliográfica

Se describirá de acuerdo a la teoría el aire comprimido, la utilización del mismo y el concepto de energía almacenada a través de comprimir el aire. Se describirá de forma breve los métodos de compresión del aire, y cuestiones fundamentales de diseño que permiten tener desde un inicio un sistema de aire comprimido eficiente, así como los costos que representan tener desperdicios y fugas en el sistema, realizando mediciones y estableciendo una auditoría energética.

9.3.2. Fase 2: recolección de datos sobre mediciones de caudal y determinación de fugas en el sistema de aire

Recorrido en planta para determinar áreas de medición de la presión y desperdicios del aire comprimido, en el manual de auditorías energéticas (*Handbook of Energy Audits*) se reconoce como una auditoría energética de nivel 1, obsérvese la figura 14 como referencia del recorrido (Thumann y Younger, 2003).

Figura 14. Diagrama de flujo del recorrido en planta



Fuente: elaboración propia.

9.3.2.1. Recolección de datos para establecer la línea base en la mejora de eficiencia energética

Al momento de realizar el recorrido es necesario tomar algunos datos, entre ellos esta definir donde se realiza limpieza con aire comprimido por medio de sopleteo, y también si hay fugas que sean perceptible a simple vista, o audibles,

siendo la siguiente tabla VI, la que se considera necesaria para la recopilación de datos:

Tabla VI. Cuadro para recopilación de datos en el recorrido de planta

Descripción equipo	¿Punto de sopleteo necesario?	¿Tiene bloqueo en la regulación a 2 Bar (30 psi)?	¿Hay fugas visibles o detectadas con ultrasonido?	Acción recomendada

Fuente: elaboración propia.

Para la medición se utilizará la tabla VII, la cual servirá para establecer los consumos y determinar a través del análisis, las fugas y la línea base a fin de estimar la eficiencia, a continuación:

Tabla VII. Listado de ubicaciones para el control de las mediciones realizadas

Descripción del equipo	Núm. Punto de medición	Equipo en vacío o con producción	Tipo de conexión		Flujo medido L/min
			Tubería o manguera	Diámetro plg o mm	

Fuente: elaboración propia.

9.3.3. Fase 3: selección del método para mejorar la eficiencia energética

Una vez establecida la línea base en la fase anterior, se procede a seleccionar el método más adecuado para corregir el uso deficiente de la energía a través de un ciclo de mejora continua, y definir cuanto se puede mejorar la eficiencia del sistema en forma teórica. En este punto se define una planificación en las siguientes subfases.

9.3.3.1. Cuantificar materiales necesarios para realizar correcciones

Se listará los materiales haciendo uso de la tabla VIII, la cual se presenta a continuación, con esto se define el costo debido a las correcciones necesarias.

Tabla VIII. **Listado de materiales para correcciones**

Área de producción	Equipo	Material	Costo

Fuente: elaboración propia.

9.3.3.2. Definir acciones que se pueden realizar de forma inmediata sin incurrir en paros prolongados

En este punto se detallan las acciones que pueden corregirse de forma inmediata en el próximo mantenimiento del equipo, sin incurrir en paros no planificados, las acciones se listan en la tabla IX.

Tabla IX. **Resumen de acciones que no requieren tiempo de paro prolongado**

Correcciones	Acción	Insumos

Fuente: elaboración propia.

9.3.3.3. Planificar de los cambios necesarios

En base a las mediciones y previendo el tiempo de paro, para evitar falta de disponibilidad del equipo, en coordinación con producción se organizan las acciones que requieren tiempo de paro prolongado, ver tabla X.

Tabla X. **Resumen de acciones que requieren tiempo de paro prolongado**

Área de producción	Equipo	Tiempo estimado cambio	Fecha cambio	Acción	Insumos

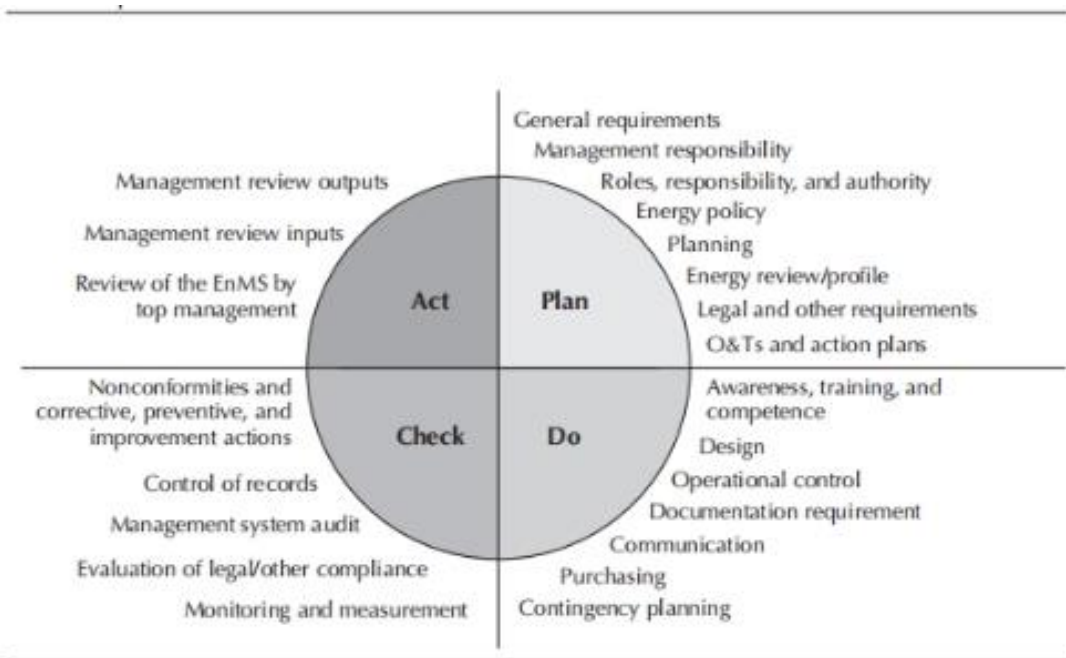
Fuente: elaboración propia.

9.3.3.4. Ciclo de mejora continua ISO 50001

Se utilizará la norma ISO 50001 como base para realizar una auditoría de eficiencia energética, donde también se plasma un ciclo de mejora continua.

Para esto puede observarse la figura 15 que fue descrita por Howell (2014), en su libro implementación efectiva de ISO 5001, respecto al sistema de gestión de la energía.

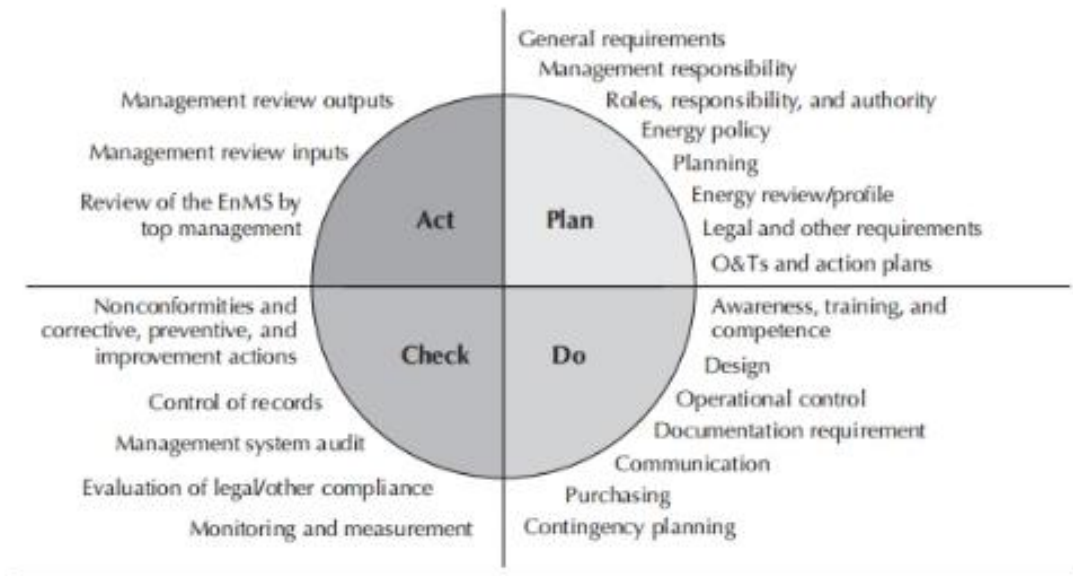
Figura 15. Descripción detallada del ciclo de mejora continua basado en ISO 5001



Fuente: Howell. (2014). *Effective implementation of an ISO 50001 energy management system (EnMS)*.

Realizando una interpretación de la figura 16, con el fin de hacer una adaptación en la empresa en cuestión donde se realiza la mejora en eficiencia energética, se tiene la figura 18, la cual se observa a continuación.

Figura 16. **Adaptación del ciclo de mejora continua para la eficiencia energética**



Fuente: Howell. (2014). *Effective implementation of an ISO 50001 energy management system (EnMS)*.

9.3.4. Fase 4: estimación de la caída de presión y pérdida de eficiencia

En esta fase se debe comparar la presión a la salida del compresor, así como también la presión en los puntos más alejados de la planta, donde se utiliza aire comprimido, a fin de definir la caída de presión y determinar si es muy abrupta, para poder corregirla posteriormente.

9.3.4.1. Contabilizar los puntos de medición de la presión

Para esto es necesario llevar el registro y se establece utilizar la tabla XI, donde se observan los datos mínimos a coleccionar para tener el registro de manera confiable.

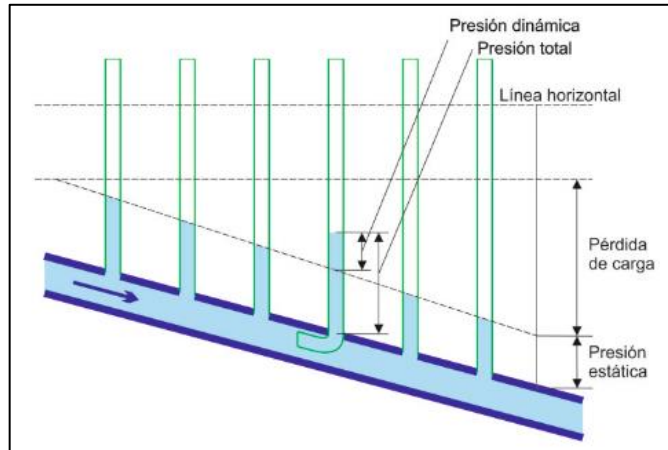
Tabla XI. **Registro de presión para determinar la caída de la misma en el sistema**

Presión a la salida del compresor <Bar (psi)>	Distancia entre compresor y punto de medición <m>	Presión en punto alejado de medición <Bar (psi)>

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se puede realizar el gráfico de caídas de presión, obsérvese la figura 17.

Figura 17. **Gráfico de barras representativo de la caída de presión**



Fuente: elaboración propia.

9.3.4.2. Definir correcciones necesarias para disminuir la caída de presión

En esta parte es necesario a través del análisis de los datos establecer las acciones y los recursos para corregir la caída de presión, para ello se utilizará la tabla XII, la cual se muestra a continuación.

Tabla XII. **Registro de acciones a realizar para disminuir la caída de presión**

Caída de presión mayor a 0.69Bar (10psi)	Recursos	Acciones

Fuente: elaboración propia.

9.3.4.3. Establecer procesos donde se puede utilizar una presión de 4 Bar (60 psi)

Esto es un ahorro directo en consumo de energía dentro de un sistema neumático.

Se debe realizar pruebas con una reducción de la presión a partir de los 6Bar, en 0.5Bar cada reducción hasta lograr los 4 Bar, para esto se debe tener en consideración las siguientes pautas:

- No hay disminución de la velocidad de producción.
- La buena calidad en la producción se mantiene, en otras palabras, se cumple el estándar de calidad establecido, ver tabla XIII.

Tabla XIII. **Registro de presión antes y después de la revisión**

Área producción	Equipo	Inicial (línea base)	Final (después de las correcciones)

Fuente: elaboración propia.

9.3.5. Fase 5. Determinación del ahorro en costo energético y la mejora en eficiencia al establecer las correcciones necesarias

Para esto se establece una tabla donde se anotan las mediciones, esto lo hace el módulo de mediciones, la cual se detalla a continuación en la tabla XIV:

Tabla XIV. **Datos sobre consumos de aire y estimación energética que representa**

Equipo	Consumo de aire	Estimación energética	Costo

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra en figura 18 a manera de representación visual el módulo de eficiencia energética, para estimar el consumo de aire y la energía que representa.

Figura 18. **Imagen ilustrativa de módulos de eficiencia**



Fuente: FESTO. *Filtros de aire comprimido*. Consultado el 28 de Julio de 2020.

Recuperado de https://www.festo.com/cat/es_es/products_030300.

Es necesario definir el porcentaje de eficiencia energética y establecer algunos indicadores que se detallan a continuación:

- Primer indicador en el sistema de aire comprimido, energía-caudal generado:

$$K_s = \text{Energía consumida} / \text{Cantidad de aire generado. (Ks = <kW / (L/min.)>}$$

- Segundo indicador en el sistema de aire comprimido, pérdida de presión-presión generada:

$$K_d = \text{Presión perdida} / \text{Presión disponible. (Kd\% = Bar / Bar)}$$

- Tercer indicador en el sistema de aire comprimido, consumo-unidades fabricadas:

$$K_c = \text{Aire consumido} / \text{Cantidad de producto fabricado. (Kc = <(L/min) / unidades producidas>}$$

Estos indicadores son los más frecuentes en los sistemas de aire comprimido. Sirven para saber el estado actual sistema, para comparar el desempeño estableciendo un estándar. Son útiles para fijar metas en los objetivos de eficiencia y ahorro energético por lo cual serán listados como aparece en la tabla XV.

Con esta misma tabla se puede generar el análisis del antes y el después, únicamente intercambiando los valores de la medición inicial, a la medición final de los consumos de aire comprimido.

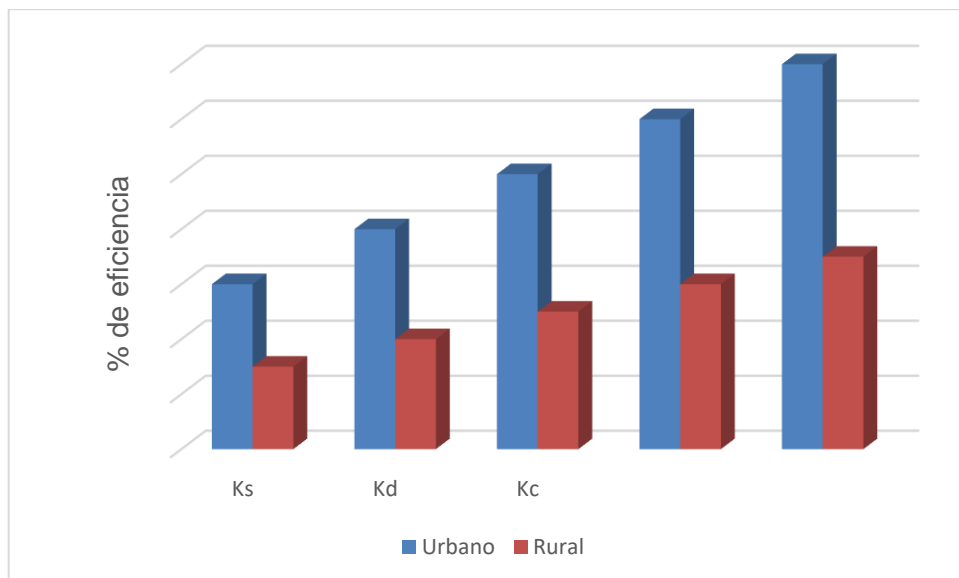
Tabla XV. **Registro de indicadores por área y equipo**

Área de producción	Equipo	Ks (kW/(L/min))	Kd (%)	Kc ((L/min)/unidades producidas)

Fuente: elaboración propia.

Para finalizar es importante hacer un comparativo de eficiencia con la medición inicial (de línea base), respecto de la medición de consumos una vez realizados los cambios en el sistema de aire comprimido, para esto puede observar la figura 19.

Figura 19. **Gráfico comparativo de indicadores de eficiencia energética**

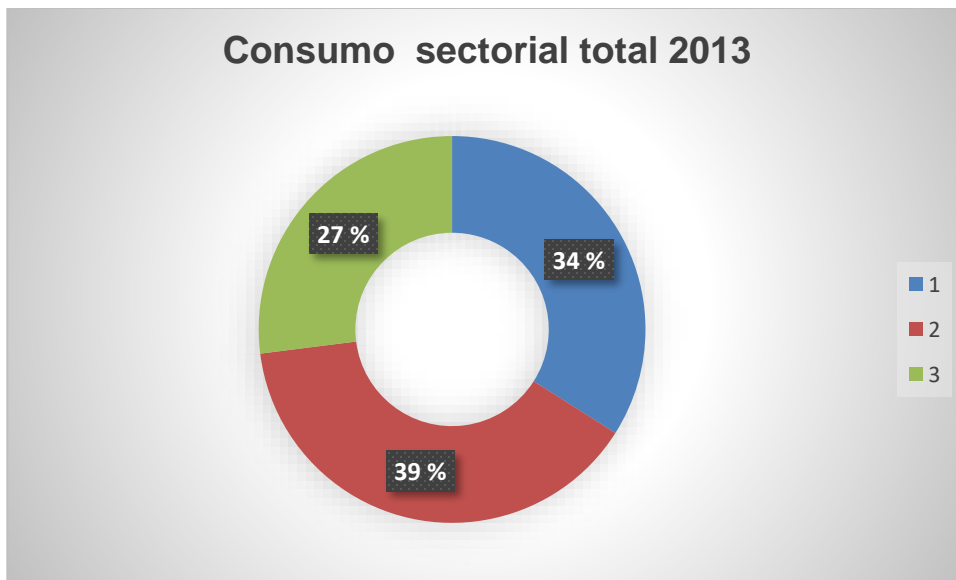


Fuente: elaboración propia.

9.3.5.1. Determinando el ahorro energético

Véase la figura 20 donde se muestra un gráfico de pie, para mostrar el ahorro energético calculado a raíz de los cambios sugeridos en la planificación por áreas de producción.

Figura 20. **Gráfico de ahorro energético por área de producción**

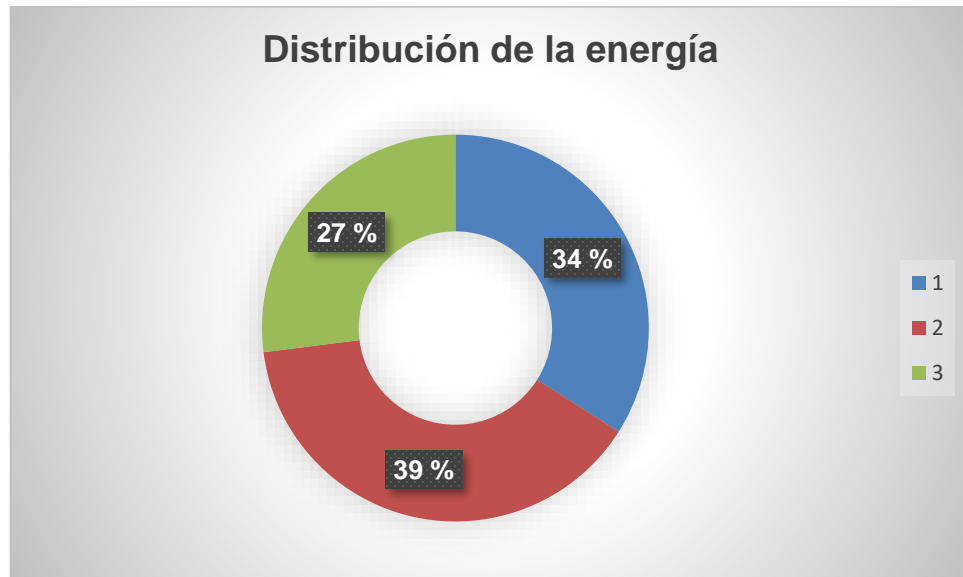


Fuente: elaboración propia.

9.3.5.2. Distribución de la energía en el sistema de Productivo

Con esto se podrá establecer como está distribuido el uso de la energía en el sistema productivo a través del aire comprimido, como se ha determinado antes, la energía se almacena en forma de aire comprimido para poder generar un trabajo. Véase la figura 21 donde se observa a través de la forma de pie como está distribuida la energía y el dinero que representa.

Figura 21. **Gráfico sobre la distribución de la energía en el sistema productivo y el dinero que representa**



Fuente: elaboración propia.

9.4. Fase 6: presentación y discusión de resultados

En esta fase se procede a la discusión de los resultados del presente estudio. Se podrá contar con los datos sobre consumos de los equipos instalados, con la eficiencia que se establecerá con la línea base y a partir de ese punto poder realizar mejoras en la eficiencia energética.

Con los resultados también será posible indicar cuál es el ahorro energético y en cuanto puede mejorarse no solo desde el punto de vista técnico sino también económico el uso del aire comprimido.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En el análisis de consumos de aire es necesario no solo hacer uso de equipo especializado en medir flujo de aire comprimido, para definir el consumo en las líneas de producción o en los equipos automatizados a través del uso del aire comprimido; sino también hacer uso del análisis a través de tablas, donde tabular la información obtenida ya sea a través de mediciones, o por medio de inspecciones visuales y con el equipo de ultrasonido para detección de fugas.

A continuación, se describen las tablas donde se recolecta la información para el análisis:

- Tabla sobre la definición de variables.
- Tabla para recopilación de datos en el recorrido de planta.
- Tabla donde se listan ubicaciones para el control de las mediciones realizadas.
- Tabla sobre listado de materiales necesarios para realizar correcciones.
- Tabla de resumen de las acciones que no requieren tiempo de paro prolongado.
- Tabla resumen de acciones que requieren tiempo de paro prolongado.
- Tabla del registro de presión para determinar la caída de presión en el sistema.
- Tabla registro de acciones a realizar para disminuir la caída de presión.
- Tabla registro de presión antes y después de la revisión.
- Tabla sobre consumo de aire y estimación energética que representa.
- Registro de indicadores por área y equipo.

Ahora se identifican las herramientas estadísticas a utilizar en el trabajo:

- Figura diagrama de flujo para el recorrido en planta.
- Figura descripción detallada del ciclo de mejora continua basado en ISO 50001.
- Figura adaptación del ciclo de mejora continua para la eficiencia.
- Figura sobre gráfico de barras representativo de la caída de presión.
- Figura ilustrativa de módulos de eficiencia.
- Gráfico comparativo de indicadores de eficiencia energética.
- Gráfico sobre el ahorro energético por área de producción.
- Figura del gráfico sobre cómo se distribuye la energía en el sistema productivo y el dinero que representa.

11. CRONOGRAMA

Tabla XVI. Cronograma de actividades

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES						
ACTIVIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
FASE 1: exploración bibliográfica	■					
FASE 2: Recolección de datos y mediciones		■				
Recorrido para definir puntos de medición		■				
Mediciones de consumo de aire		■				
Mediciones para detección de fugas		■				
FASE 3: Método para mejorar la eficiencia energética			■			
Planificación de cambios necesarios			■			
Definir materiales necesarios			■			
Definir acciones para corregir caídas de presión			■			
Utilizar ISO 5001 para mejorar la eficiencia			■			
FASE 4: Estimar caídas de presión y pérdida de eficiencia				■		
FASE 5: Determinación del Ahorro Energético				■	■	
Determinar costos por Fugas				■	■	
Establecer posibles ahorros energéticos				■	■	
FASE 6: Presentación de resultados					■	■

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La presente investigación se realizará con el apoyo de una empresa de automatización industrial, que cuenta con los equipos de medición como parte de un servicio y que también vende los equipos para poder realizar dichas mediciones, ya sea equipo instalado de forma dedicada en alguna línea de producción o bien portátil, como es el caso del módulo que se utilizará en este trabajo.

También se cuenta con los recursos de la empresa de producción industrial, debido a su interés primordial por la eficiencia energética, en diferentes sistemas dentro de la planta y dado que el aire comprimido representa una parte importante en las instalaciones, no solo a nivel operativo, sino también a nivel energético.

Y por último con los recursos propios en la investigación para poder realizar las mediciones, así como determinar a través del análisis y apoyándose en otras investigaciones realizadas, una línea base energética y la metodología para mejorar la eficiencia energética. Para tal efecto se realiza la tabla XIV donde se observa los recursos necesarios para dicha investigación.

Tabla XVII. **Recursos de la investigación**

Recurso	Costo	
Detector de fugas ultrasónico portátil	Q.	00.00
Medidor de caudal calorimétrico portátil	Q.	00.00
Movilización y viáticos	Q.	2,240.00
Equipo de protección personal	Q.	605.00
Asesor	Q.	2,500.00
Equipo de cómputo	Q.	00.00
Costo de la investigación	Q.	5,370.00

Fuente: elaboración propia.

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

13. REFERENCIAS

1. AChEE. (2012). *Promoción de gestión energética. Guía de Implementación de Sistema de gestión de la Energía Basada en ISO 50001*. Santiago de Chile: Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Recuperado de https://issuu.com/guias-agencia-ee/docs/gui__a_de_50001_-_alta_calidad.
2. Alanís, B., Beltrán, V. y Velarde, J. (2018). *Eficiencia energética para empresas que utilizan aire comprimido en su proceso de producción* (Proyecto de investigación). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Toluca, México. Recuperado de https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/632435/Resume_n%20Ejecutivo%20Binacional.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
3. Atlas Copco. (2011). *Manual del aire comprimido*. Bélgica: Atlas Copco Airpower. Recuperado de <https://es.slideshare.net/Suggestive/atlas-copcomanual-del-aire-comprimido-7th-edition>.
4. Atlas Copco. (2019). *Aplicaciones de aire comprimido*. Bélgica: Atlas Copco Airpower. Recuperado de <https://www.atlascopco.com/es-mx/compressors/wiki/compressed-air-articles/compressed-air-applications>.

5. Barrientos, E. (2017). *Optimización de la red de aire comprimido en el área de servicio rápido de Ingenio Pantaleón* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6614/1/Estuardo%20Adolfo%20Barrientos%20Mej%C3%ADa.pdf>.
6. Bobadilla, J. (2019). *Evaluación de la eficiencia energética del sistema de aire comprimido en una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla* (Disertación doctoral). Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/250629316.pdf>.
7. Boge Compresores. (s.f.). *Técnica de aire comprimido*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.drucklufttechnik.de/english/>.
8. Cengel, Y. y Boles, M. (2014). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
9. Chapman, S. (2014). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill. pp. 128-130, 220-223, 278 -282.
10. Fajardo, M., Cuchimba, J., Escobar, V. y Marulanda, J. (30 de julio de 2019). Propuesta de auditoría energética para la industria aplicada a un caso de estudio del sector plástico. *DYNA*, 86(210), 345-354. Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/496/49662789044/html/index.html>.

11. FESTO. (2020). *Filtros de aire comprimido*. [Mensaje de blog]. Recuperado de https://www.festo.com/cat/es_es/products_030300.
12. FESTO. (s.f.). *Neumática*. [Mensaje de blog]. Recuperado de https://www.festo.com/wiki/en/Air_in_pneumatics.
13. Gutiérrez, H. (2017). *Diagnóstico del sistema de generación y distribución de aire comprimido para determinar pérdidas y análisis de costos en una industria de grasas y aceites* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8030/1/Hugo%20Aston%20Gutiérrez%20Zamora.pdf>.
14. Hanlon, P. (2001). *Compressor handbook*. Louisville, Kentucky: McGraw-Hill.
15. Hesse, S. (2002). *Aire comprimido fuente de energía: preparación y distribución*. Alemania: Festo AG & Company.
16. Howell, M. (2014). *Effective implementation of an ISO 50001 energy management system (EnMS)*. Estados Unidos: Asq Pr.
17. Isotools. (s.f.). *Normas ISO 50001*. [Mensaje de blog]. Recuperado de: <https://www.isotools.org/normas/medio-ambiente/iso-50001>.

18. Juárez, K. (2014). *Implementación de criterios para selección y clasificación de sistemas de tratamiento de aire comprimido para la industria en Guatemala, en Kaeser compresores* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0802_M.pdf
19. Lleó, A. y Lleó, L. (2011). Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades. España: Díaz de Santos, S. A.
20. Luna, A. (2009). Generación de aire comprimido. Guatemala: Kaeser Guatemala.
21. Machado, C. (1 de diciembre de 2010). Gestión energética empresarial una metodología para la reducción de consumo de energía. *Dialnet*, 5(2), 107-127. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3875716>.
22. Majumdar, S. (1998). *Sistemas neumáticos. Principios y Mantenimiento*. México: McGraw-Hill.
23. Mariani, L. y Reis, N. (2017). Eficiencia energética y calidad de la energía. Brasil: Editora y distribuidora educacional, S. A.
24. Martín, R. y García, T. (1 de junio de 2014). La preparación del aire comprimido en la industria farmacéutica. *Pharmatech*, 8(1), 50-52. Recuperado de https://www.pharmatech.es/descargar_documento/FESTO.pdf.
25. Méndez, E. (2009). *Curso de neumática básica*. Guatemala: INTECAP.

26. Michinel, J. y Martínez, A. (1 de enero de 1994). El concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sub-lenguaje. *Investigación y experiencias didácticas*, 12(3), 369-380. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21377/93333>.
27. Morell, A. (s.f.). ISO 50001. *Sistema de gestión de la energía: Requisitos ISO 50001:2011. Planificación*. Argentina: Creara. Recuperado de http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia_energetica/2planificacionenergetica.pdf.
28. Narvaéz, F. (2018). Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido. Bogotá: Fluid and Pipe Ingeniería LTDA. Recuperado de <https://www.colombiaproductiva.com/getattachment/1da39f8c-764c-48c6-957a-9c2f14b81e28/Memorias-sistema-de-aire-comprimido.aspx>.
29. Ordóñez, S. y Cifuentes, J. (1 de enero de 2016). Eficiencia energética en sistemas de aire comprimido industrial. *Energía y Ambiente, Vol. único*, 1-4. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4451/1/Eficiencia%20energ%C3%A9tica%20en%20sistemas%20de%20aire.pdf>.
30. OVACEN. (s.f.), Auditorías energéticas. Definición, ámbito de actuación y normativa. [Mensaje de blog]. Recuperado de: <https://ovacen.com/auditorias-energeticas-definicion-ambito-actuacion-normativa/>.

31. Paredes, J. (2016). *Diseño de las redes de aire comprimido y transporte neumático en un astillero* (Trabajo de investigación). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5707/tfe-par-dis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
32. Salvatori, M. (2003). *Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación voltaje/frecuencia* (Tesis de licenciatura). Universidad de las Américas Puebla, México. pp. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/capitulo_3.html.
33. Solé, A. (2012). *Neumática e hidráulica*. España: Marcombo.
34. Thumann, A. y Younger, W. (2003). *Handbook of energy audits*. La India: The Fairmont Press, Inc.
35. Vega, J. (2018). *Metodología de una auditoría de eficiencia energética en la industria alimenticia* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/9880/1/Jos%C3%A9%20Eduardo%20Vega%20Maldonado.pdf>.
36. Wark, K. y Richards, D. (2001). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.

37. Zhimnaycela, C. y Camposano, D. (2011). *Implementación de un sistema de aire comprimido para un taller de mecánica automotriz* (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21356/1/Proyecto%20Camp-Zhim.pdf>.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Pregunta principal	Objetivo	VARIABLES	Metodología	Plan de acción
¿Puede el diseño de investigación del desarrollo de un módulo de medición de consumos y detección de fugas, mejorar la eficiencia energética en un sistema de aire comprimido?	Objetivo general Desarrollar un módulo de medición de consumos y detección de fugas, para mejorar la eficiencia energética en un sistema de aire comprimido.	Incremento de la eficiencia energética	Mediciones en los equipos para determinar los consumos y fugas de aire comprimido por medio de un módulo de mediciones.	Utilizar un módulo de mediciones para consumos de aire comprimido y detección de fugas, para establecer una línea base y mejorar la eficiencia energética.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Energía desperdiciada en procesos de limpieza y sopleteo sobre los equipos en L/min. Calculo orificio en fugas en mm ² Tamaño de la fuga en Litros/minuto.	- Establecer y definir puntos donde realmente se requiere sopleteo y limpieza con aire comprimido a una presión de 30psi. - Conectar en serie el equipo de Medición, entre la tubería de aire comprimido y el equipo al que se suministra para cuantificar consumos y fugas con equipo en reposo. - Establecer el tamaño de la fuga en mm ² que representa.	- Realizar visita técnica con supervisores de Mantenimiento y producción para definir puntos donde se requiere limpieza con aire comprimido (1 semana). - Realizar mediciones de consumo en las tomas de aire comprimido para los diferentes equipos de la línea de envasado (2 semanas). - Recorrido por tuberías y accesorios con el equipo ultrasónico para determinar fugas (2 semanas).
1. ¿Cómo se podrá identificar las fugas por medio de un equipo de medición de consumos de aire comprimido y ultrasónico, para mejorar la eficiencia energética?	1. Identificar las fugas por medio de un equipo de medición de consumos de aire y ultrasónico.			- Planificar los cambios necesarios para mejorar el consumo de aire en los equipos (1 semana). - Definir los materiales necesarios para poder planificar la corrección de las fugas (1 semana). - Definir las acciones a seguir para la planificación en la corrección de dichas caídas de presión (1 semana). - Utilizar la metodología ISO 50001 para establecer mejorar en la eficiencia energética del sistema de aire comprimido (3 semanas).
2. ¿Cuál será el mejor método para corregir el uso deficiente de energía en forma de aire comprimido dentro de la planta de producción?	2. Definir un método para corregir el uso deficiente de energía en forma de aire comprimido dentro de la planta de producción.	Energía en kWh/Mes que logra reducirse el consumo de aire en Litros/min normalizados.	- Por medio de las mediciones se estable en cuanto se puede mejorar la eficiencia energética del sistema de aire comprimido a través del análisis.	

Continuación apéndice 2.

<p>3. ¿Se puede reducir la caída de presión para evitar pérdidas de eficiencia energética en el sistema de aire comprimido a través de establecer puntos de mejora?</p>	<p>3. Reducir la caída de presión para evitar pérdidas de eficiencia energética en el sistema de aire comprimido a través de establecer puntos de mejora.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Presión en Bar (psi) - La caída de presión menor a 0.7Bar (10psi) desde la generación hasta la toma de aire más alejada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Por medio de indicadores de presión, cuantificar cual es la caída de presión a diferentes horas, dependiente del pico de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de la presión en diferentes puntos del sistema de distribución, para poder determinar caídas de presión (2 semanas). - Planificar acciones para reducir la caída de presión (1 semana).
<p>4. ¿Cuál será el ahorro en costos de la energía por fugas y desperdicios en el uso del Aire Comprimido?</p>	<p>4. Calcular el ahorro en costos de la energía por fugas y desperdicios en el uso del Aire Comprimido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Q/kWh que representan las fugas y desperdicios. - Eficiencia Energética kWh/Unidad producida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Conociendo el costo de energía y los Litros/min que representa las fugas y desperdicios, se obtiene el costo de las fugas y desperdicios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consulta bibliográfica para determinar costos por fugas (1 semana). - Análisis de datos sobre las mediciones realizadas para tabular resultados de costos (1 semana) - Establecer los posibles ahorros de forma teórica (1 semana).

Fuente: elaboración propia.

