



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

**TEMA:**

**Análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en  
proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras**

**AUTOR:**

**Paladines Lizondo, Jorge David**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de  
INGENIERO EN ELÉCTRICO- MECÁNICA**

**TUTOR:**

**ING. Suárez Murillo, Efraín Oswaldo. MSC.**

**GUAYAQUIL, ECUADOR**

**16 de septiembre el 2022**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por: **Paladines Lizondo, Jorge David** como requerimiento para la obtención de Título de **Ingeniería en Eléctrico Mecánica**.

TUTOR

ING. SUÁREZ MURILLO, EFRAÍN OSWALDO. MSC.

DIRECTOR DE CARRERA

ING. CELSO BAYARDO BOHÓRQUEZ ESCOBAR. MSC

Guayaquil, a los 16 días de Septiembre del año 2022



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Paladines Lizondo, Jorge David**

### DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras**, previo a la obtención del Título de **Ingeniería en Eléctrico Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecutivamente este trabajo es de mi total autoría. En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 16 días de septiembre del año 2022

EL AUTOR



**PALADINES LIZONDO, JORGE DAVID**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

## AUTORIZACIÓN

Yo, **Paladines Lizondo, Jorge David**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación, **Análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 16 días de septiembre del año 2022

EL AUTOR



---

**PALADINES LIZONDO, JORGE DAVID**

## REPORTE URKUND

Se indica el resultado de coincidencia al 0% del trabajo de titulación **análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras** del estudiante **Paladines Lizondo, Jorge David**. en la carrera ingeniería Eléctrico Mecánica

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are listed: 'Documento' is 'TESIS PALADINES para URKUND-V2.pdf (D143681063)', 'Presentado' is '2022-09-06 12:42 (-05:00)', 'Presentado por' is 'efrain.velez@cu.ucsg.edu.ec', 'Recibido' is 'efrain.velez.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje' is 'Paladines V2' with a link to 'Mostrar el mensaje completo'. A green box indicates '0%' of 18 pages are from sources present in 0 sources.

On the right, there is a 'Lista de fuentes' table with columns 'Categoría' and 'Enlace/nombre de archivo'. It lists several sources from 'Universidad Católica de Santiago de Guayaquil' with IDs like D143547071, D143622855, D143358804, and D143358805. A 'Fuentes alternativas' section is also visible.

At the bottom, a search results pane is open for 'Archivo de registro Urkund: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D143...'. It shows a 99% match and a message: 'No se pueden mostrar el contenido del documento de origen! Posibles razones: 1. El documento se guarda en la sección URKUND Partner y aparece como inaccesible. Si usted no posee este libro, tiene que comprarlo por medio del proveedor. 2. El autor ha eximido el documento como fuente visible en el Archivo URKUND. Remitente y receptor de información está disponible con solo pasar el puntero del ratón sobre el nombre de la fuente anterior.'

TUTOR

Ing. Efraín Oswaldo Suárez Murillo

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento eterno a mis padres que son la manifestación del amor que Dios nos da, a mis hermanos por ser inspiración en mi deseo de superación sin ellos no lo hubiese alcanzado. Cerrando un ciclo de vida agradezco a DIOS todo poderoso que con su infinita bendición me ha permitido llegar hasta este día sin el nada es posible. Ya que ha puesto en mi camino a personas valiosas en el momento exacto.

A la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

El Autor

## **DEDICATORIA**

A mis padres que con ferviente amor han sabido guiarme en el cumplimiento de esta etapa estudiantil universitaria, dedico este trabajo de titulación a ellos

A mi esposa por su comprensión y apoyo para culminar este trabajo de titulación. A mis profesores por su enorme dedicación y paciencia que supieron guiarme en este difícil pero no imposible camino gracias infinitas. Hoy es el momento de empezar a recoger los frutos de este esfuerzo en el que ustedes me ayudaron a no dejar mis sueños y verlos cristalizarse.

El autor



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

ING.ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS, M.Sc.

DECANO

---

ING. EFRAIN OLIVERIO VELEZ TACURI MGS.

COORDINADOR DE TITULACIÓN

---

ING. M.SC. TOMÁS BASTIDAS CABRERA

OPONENTE



## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	2
1.1 Introducción .....	2
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Justificación del problema .....	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Hipótesis.....	4
1.6 Metodología de investigación .....	4
CAPÍTULO 2: INSTALACIONES DE AIRE PRESURIZADO .....	5
2.1 Propiedades del aire .....	5
2.1.1 Unidades de presión atmosférica .....	5
2.2 Aplicaciones del aire comprimido.....	8
2.3 Componentes Neumáticos .....	9
2.4. Compresores.....	9
2.4.1 Tipos de compresores .....	10
2.4.2 De émbolo oscilante .....	10
2.4.2.2 Compresor de diafragma o membrana .....	12
2.4.3 Compresor de émbolo rotativo .....	13
2.4.3.1 Compresor de Paletas .....	13
2.4.3.2 Compresor tipo giratorio bicelular: .....	15
2.4.3.3 Compresor volumétrico roots .....	15
2.4.4. Turbocompresores .....	16
2.4 Auditoria energética en instalaciones de aire comprimido .....	18

2.5	Diseño de una Red de Aire Comprimido .....	19
2.5.1	Parámetros de una RAC .....	19
2.5.1.1	Presión.....	19
2.5.1.3	Pérdida de presión.....	19
2.5.1.4	Velocidad de circulación .....	21
2.5.1.5	Temperatura .....	21
2.5.2	Diseño de la tubería .....	23
2.6	Factores en el diseño e instalación de la RAC.....	24
2.7	Softwares de simulación de una RAC .....	25
2.8	Mantenimiento.....	26
2.9	Criterios de generación de aire comprimido.....	27
2.9.1	Comprimir aire .....	27
2.9.2	Mal uso del aire comprimido.....	29
2.10	Indicador de Fuga .....	33
CAPÍTULO 3: AUDITORÍA ENERGÉTICA A COMPRESORES.....		35
3.1	Datos de Placa de los Compresores.....	35
3.2	Datos Tanques Pulmones.....	37
3.3	Red de distribución de aire comprimido .....	37
3.4	Diagrama de conexión actual.....	38
3.4.1	Diagrama actual de compresores – Zona Rendering .....	38
3.5	Configuración de compresores .....	38
3.6.1	Mediciones en compresores.....	40
3.6.2	Procedimiento para el registro de datos con Aireport.....	40
3.6.3	Conexión de la pinza amperimétrica .....	41
3.6.4	Constitución de la auditoría .....	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DEL AIRE COMPRIMIDO.....		43

<b>4.1 Determinación del consumo total de la planta.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Determinación del consumo energético total .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.1 Detalle de operación en carga y vacío .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2 Detalle de consumo energético .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3 Verificación del día con más consumo .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.1 Caudal, Presión, Carga y Vacío.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.2 Medición de consumo energético en primer día ...</b>	<b>48</b>
<b>4.3.3 Detalle de consumos caudal y energético en 1 día..</b>	<b>48</b>
<b>4.3.4 Comparación del consumo de energía.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.4 Desempeño de los compresores .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Verificación en día de menor consumo.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4.1 Verificación del cálculo de consumo por fugas ....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.2 Reporte de consumo por el Datalogger .....</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>57</b>
Referencias.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2:

Figura 2. 1 Producción y distribución de aire presurizado .....	5
Figura 2. 2 Unidades empleada en aire presurizado .....	6
Figura 2. 3 Entradas, salidas y eficiencia energética de los componentes de un sistema de aire comprimido .....	7
Figura 2. 4 Porcentaje de cantidad de energía de compresores de aire y otras máquinas .....	8
Figura 2. 5 Tipos de compresores .....	10
Figura 2. 6 Compresor Roots.....	15
Figura 2. 7 Compresor radial o centrífugo .....	16
Figura 2. 8 Operación de un compresor axial.....	17
Figura 2. 9 Temperatura promedio en la ciudad de Cuenca. ....	22
Figura 2. 10 Monograma para la determinación de los diámetros de la tubería.....	23
Figura 2. 11 Ejemplo de una red y sus accesorios .....	26
Figura 2. 12 Impulsores centrífugos (izquierda) o tornillos rotativos (derecha) para comprimir aire.....	28
Figura 2. 13 Refrigeración personal de un trabajador.....	31
Figura 2. 14 Soplado durante el proceso de fabricación.....	32

### CAPÍTULO 3:

Figura 3. 1 Diagrama actual de compresores.....	38
Figura 3. 2 Configuración de compresores para la planta de producción de aves .....	39
Figura 3. 3. Equipo de registro BOGE .....	40

### CAPÍTULO 4:

Figura 4. 1. Consumo Total de la Planta de los siete días auditados. ....	43
---	----

Figura 4. 2. Consumo energético total.....	44
Figura 4. 3. Medición de consumo de caudal .....	46
Figura 4. 4 Medición del consumo de presión .....	47
Figura 4. 5 Comprobación de carga y vacío .....	47
Figura 4. 6 Comparación del consumo de energía con la auditoría.....	50
Figura 4. 7 Comportamiento de los compresores en carga, vacío, Off....	51
Figura 4. 8 Consumo de caudal en día de menor operación del compresor .....	52
Figura 4. 9 Día de menor consumo de presión.....	52
Figura 4. 10 Desempeño de los compresores en los días de menor consumo .....	53

## INDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2:

Tabla 2. 1 Perdida de presión de algunos dispositivos. ....20

Tabla 2. 2 Usos indebidos del aire comprimido y las alternativas sugeridas  
.....33

### CAPÍTULO 3:

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

### CAPÍTULO 4:

Tabla 4. 1. Detalle de consumo (caudal) aire presurizado.....45

Tabla 4. 2 Resumen de consumo en KW por parte de compresores .....45

Tabla 4. 3 Capacidad de generación de aire, el consumo energético y % de  
carga y vacío.....48

Tabla 4. 4 Consumo energético, % de consumo energético y el consumo  
energético por metro cúbico .....49

Tabla 4. 5 Datos y mediciones.....50

Tabla 4. 6 Consumo por el Datalogger el 30/07/2022 .....54

## **RESUMEN**

El presente trabajo académico enfoca el análisis de energía desperdiciada en un sistema de aire comprimido industrial, las fugas de aire comprimido vienen a ser energía desperdiciada. El objetivo principal es determinar fugas y averías del aire presurizado en las instalaciones de la planta, desde su etapa de generación hasta la red de distribución. La aportación de este análisis plantea un plan de mejoras para reducción de costos por fugas no detectadas en la instalación de aire presurizado. Las fugas no detectadas son problemas de mantenimiento en curso y pueden aparecer en cualquier parte del sistema. Estas fugas requieren un programa continuo de detección y reparación de fugas de aire. La metodología a emplear es bibliografía por la revisión técnica de los criterios de consumo (caudal, presión) de aire comprimido y de vacío. Se emplea el método analítico para realizar el levantamiento de equipos de generación y almacenamiento de aire presurizado en carga y vacío. Finalmente, el método comparativo que toma en cuenta la norma ISO 8573-1 que corresponde eficiencia energética del aire comprimido en la planta, por lo tanto, se pondera costos relacionados con consumo de caudal, de presión y de energía eléctrica.

**PALABRAS CLAVES: Fugas, Eficiencia energética, Compresor, Red de distribución, Auditoria.**

## **ABSTRACT**

This academic work focuses on the analysis of wasted energy in an industrial compressed air system, compressed air leaks become wasted energy. The main objective is to determine leaks and breakdowns of pressurized air in the plant facilities, from its generation stage to the distribution network. The contribution of this analysis proposes an improvement plan to reduce costs due to undetected leaks in the pressurized air installation. Undetected leaks are ongoing maintenance issues and can appear anywhere in the system. These leaks require an ongoing air leak detection and repair program. The methodology to be used is bibliography for the technical review of the consumption criteria (flow, pressure) of compressed air and vacuum. The analytical method is used to carry out the lifting of equipment for the generation and storage of pressurized air in load and empty. Finally, the comparative method that takes into account the ISO 8573-1 standard that corresponds to energy efficiency of compressed air in the plant, therefore, costs related to flow, pressure and electrical energy consumption are weighted.

**KEY WORDS:** Leaks, Energy efficiency, Compressor, Distribution network, Audit.



# **CAPÍTULO 1:**

## **GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **1.1 Introducción**

El uso de aire comprimido está tan extendido. Las instalaciones de aire comprimido son instalaciones básicas que están presentes en prácticamente la totalidad de establecimientos industriales de todo tipo. En instalaciones de aire comprimido, las fugas pueden ser una fuente importante de energía desperdiciada, a veces desperdiciando entre el 20 y el 30 % de la energía de un compresor. (INTEC, 2018).

Los sistemas de compresores de aire consumen entre el 10% y el 30% o más de la energía eléctrica de la planta. Se necesitan 7 unidades de energía eléctrica para producir 1 unidad de energía neumática equivalente. Además, un sistema de aire comprimido típico desperdicia el 50% del aire producido. Las fugas de aire comprimido por sí solas representan casi el 20% del uso de aire comprimido. (Cristian Toledo, 2021).

Por aquello es primordial, la detección y reparación proactiva de fugas en una instalación de aire comprimido industrial. (Educarex, 2016). Por otro lado, la detección y reparación proactiva de fugas puede reducir las fugas a menos del 10 % de la salida del compresor. Por consiguiente, se producen exceso de capacidad del compresor, lo que resulta en costos más altos de lo necesario. También menor vida útil y mayor mantenimiento del equipo de suministro (incluido el paquete del compresor) debido a ciclos innecesarios y mayor tiempo de funcionamiento. (Parker Hannifin España SA, 2011).

### **1.2 Definición del problema**

En la actualidad en la industria con máquinas y herramientas neumática existen pocos aportes o documentos que realicen una evaluación energética con eficiencia energética. Dentro de una planta empacadora de tilapia se evidencia, el desperdicio de aire en dos de sus compresores, estos trabajan de forma continua y casi sin descanso. De esta manera el aire comprimido se pierde en forma de calor y esto es irrecuperable y genera costos o pago de facturas eléctricas elevadas.

Las fugas de aire comprimido además de ser una fuente de energía desperdiciada, también pueden contribuir a otras pérdidas operativas. Las fugas provocan una caída en la presión del sistema, lo que puede hacer que las herramientas neumáticas funcionen de manera menos eficiente, afectando negativamente la producción. Además, obligan al equipo de generación de aire a realizar ciclos con más frecuencia, las fugas también pueden acortar la vida útil de casi todos los equipos del sistema (incluido el compresor). El aumento del tiempo de funcionamiento también puede generar requisitos de mantenimiento adicionales y un mayor tiempo de inactividad no programado.

### **1.3 Justificación del problema**

Los altos costos indirectos asociados a las fugas desde la producción de aire comprimido, determinados por el consumo de potencia eléctrica, además de costos de mantenimiento, repuestos y operación de los equipos de producción de aire comprimido, son también parámetros importantes a considerar en el estudio de la red de aire comprimido industrial.

Se justifica que para fines de crecimiento y optimizar recursos, se deben reducir las fugas o pérdidas de aire comprimido.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Analizar las fugas en el sistema de aire comprimido de un proceso industrial para lograr la eficiencia energética en su procesamiento

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Describir la operación de sistemas de aire comprimido en una planta industrial.
2. Verificar datos de equipos y máquinas que utilizan aire comprimido en una planta procesamiento de desechos de aves
3. Comparar valores obtenidos con normas de auditoría energética en aire comprimido.

4. Diseñar una propuesta de plan de mejoras para la eficiencia energética del aire comprimido.

## **1.5 Hipótesis**

Las mediciones a realizarse en una planta reducirán significativamente la tarifa de energía eléctrica y esto ayudará a la productividad. La aportación de este trabajo contribuye a solucionar un problema a una empresa que emplea instalaciones de aire comprimido.

## **1.6 Metodología de investigación**

El tipo de investigación utilizado en este trabajo es; de tipo bibliográfico por cuanto se busca conocer la operación de las máquinas de producción de aire presurizado, y su red de distribución hacia la carga o consumo, además el método analítico porque se registran consumos de caudal y de energía eléctrica por parte del banco de compresores. Se aplica el método comparativo en base a la norma ISO 8573-1 para analizar resultados de mediciones en la producción y red de distribución de una instalación de aire comprimido de una planta industrial.

## CAPÍTULO 2: INSTALACIONES DE AIRE PRESURIZADO

### 2.1 Propiedades del aire

Generar aire comprimido o presurizado es un proceso que lo efectúa un compresor, estas máquinas eléctricas son utilizadas en numerosas industrias, En el proceso antes dicho exista un gran consumo de energía eléctrica. Sin embargo, el aire se puede decir es gratuito, es incoloro, compresible, esta última propiedad facilita que pueda ser almacenado en depósitos o tanques, el desperdicio de aire comprimido es inoportuno. Cualquier ahorro realizado en los sistemas de aire comprimido puede tener un impacto significativo en los costos y el medio ambiente. En la figura 2.1 se muestra una instalación de aire comprimido que consta de la máquina que genera aire presurizado y el equipo de tratamiento de aire primarios (secadores, enfriadores, etc.). Su red de distribución son tuberías donde emplea accesorios respectivos para conectar luego herramientas y equipos neumáticos.

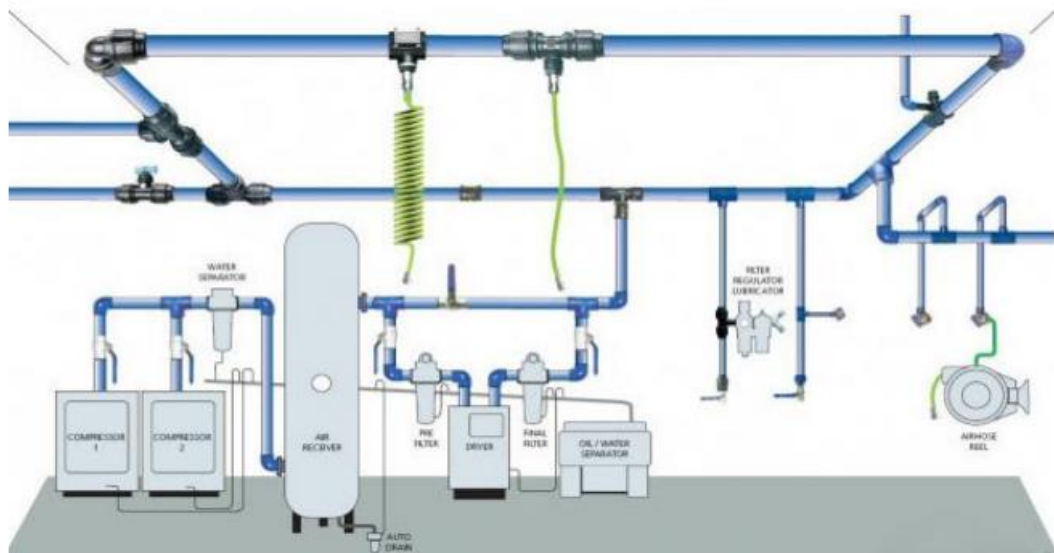


Figura 2. 1 Producción y distribución de aire presurizado  
Fuente. (Narvaez, 2018)

#### 2.1.1 Unidades de presión atmosférica

En el sistema internacional de unidades, Pa (Pascal) es la unidad básica de presión aceptada.

Como 1 pascal corresponde a una presión muy pequeña, al hablar del aire comprimido se emplea normalmente la unidad:

kPa (1 kilo pascal = 1000 Pa) o MPa (1 mega pascal=1000 kPa).

La presión general de aire en la superficie de la Tierra puede especificarse de diferentes maneras, con más o menos el mismo significado:

1 atm (atmosfera) = 1 kp/cm<sup>2</sup> (kilopondio/cm<sup>2</sup>)

100 kPa (kilo pascal) = 1 bar

La presión del aire comprimido se especifica habitualmente como sobrepresión, es decir, una presión superior a la presión atmosférica normal. Normalmente es una expresión implícita, pero a veces se aclara añadiendo una (e), kPa(e). La presión de trabajo de un compresor se especifica generalmente como sobrepresión.

En la figura 2.2 se muestra bloques con unidades utilizadas en instalaciones de aire comprimido o presurizado

	Flujo Volumétrico	Presión	Potencia	Temperatura
Sist. Anglo	CFM Pie cubico / minuto	PSI Libra / pulgada cuadrada	HP Caballo	F Grados Fahrenheit
Internacional	Lt / Min. Metro cubico / Hora	Bar Bar	KW Kilovatio	C Grados Centigrados
Equivalencias	1 CFM = 1,69 M3/Hr. 1 CFM = 28,3 Lt/Min	1 Bar = 14,5 PSI 1 PSI = 6,9 Kpa	1 HP = 0,74 KW	F = 1,8 C + 32 C = 0,55 (F - 32)

Figura 2. 2 Unidades empleada en aire presurizado

Fuente: (Narvaez, 2018)

El consumo eléctrico de los compresores es alrededor de 0,2 KW por cada 1 CFM generado a 100 PSI, los secadores refrigerativos consumen 0,01 KW, por cada CFM tratado. Es decir, la generación consume más del 95% de la energía eléctrica empleada en el sistema.

La eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido se puede calcular de varias formas, que se aplican según el componente y se conocen como indicadores claves de desempeño o KPI (Key Performance Indicator). Para Pascal van Putten, director general de la empresa VPIstruments. el

15% de la energía eléctrica absorbida por los compresores de aire se convierte en aire comprimido. El 85% restante se pierde en forma de calor. A pesar de esta baja eficiencia, el aire comprimido sigue siendo una utilidad muy popular en muchas industrias. Los usuarios de sistemas de aire comprimido se enfrentan al reto de obtener la mayor eficiencia posible y reducir al máximo los costes asociados (energía, mantenimiento). Por lo tanto, la supervisión del conjunto adecuado de KPI es hoy en día una necesidad para cualquier gestor energético o propietario de una planta. (VP INSTRUMENT, 2017)

A continuación, ciertos KPIs:

Suministro.

$K_s = \text{Energía consumida} / \text{Cantidad de aire generado}$ . ( $K_s = \text{KW} / \text{CFM}$ )  
(20KW/100CFM)

Distribución.

$K_d = \text{Presión perdida} / \text{Presión disponible}$ . ( $K_d\% = \text{PSI} / \text{PSI}$ ) (2%)

Consumo.

$K_c = \text{Aire consumido} / \text{Cantidad de producto fabricado}$ . ( $K_c = \text{CFM} / \# \text{ Prod.}$ )  
(C/Usuario)

Estos KPIs son los más frecuentes en los sistemas de aire comprimido. Sirven para saber el estado actual sistema, para comparar el desempeño con estándares y con la competencia. Son útiles para fijar metas en los objetivos de ahorro energético (Narvaez, 2018).

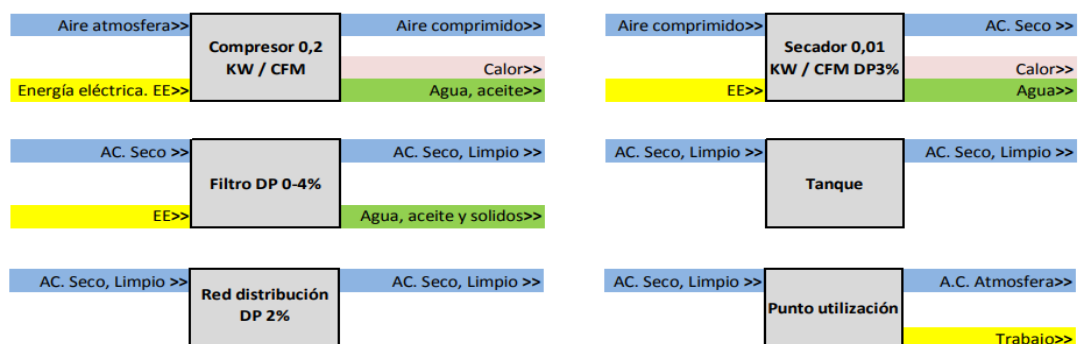


Figura 2. 3 Entradas, salidas y eficiencia energética de los componentes de un sistema de aire comprimido

Fuente: (Narvaez, 2018)

## 2.2 Aplicaciones del aire comprimido

El aire comprimido o presurizado es uno de los servicios industriales que más consume energía eléctrica, los compresores de aire son muy ineficientes desde el punto de vista energético, casi el 80% de la energía la transforman en calor y solo el 20% se transforma en presión, es común que solo el 10% de la energía consumida llegue al usuario final. En la industria el aire comprimido utiliza en promedio el 18% de la energía eléctrica consumida (Narvaez, 2018).

La figura 2.4 muestra el porcentaje o cantidad de energía utilizada por los compresores de aire en relación al total de la energía eléctrica consumida por la industria en USA.

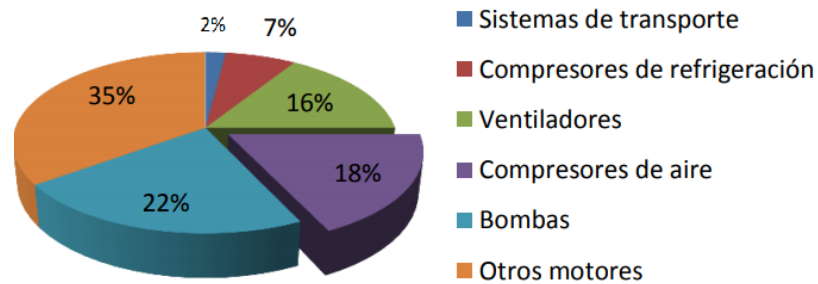


Figura 2. 4 Porcentaje de cantidad de energía de compresores de aire y otras máquinas  
Fuente: (Kaeser, 2018)

La mayoría de los sistemas neumáticos dependerán de un suministro constante de aire comprimido para funcionar y esto proviene de los compresores de aire. El compresor extrae aire de la atmósfera y lo almacenará dentro de un tanque de alta presión llamado receptor (Torres, 2022). Una vez reducido su volumen (presión del aire se eleva) el aire, fluirá por la red de distribución de aire presurizado hacia las cargas que demanden del caudal de aire,. (Atlas Copco, 2016)

Por ejemplo, cuando un ingeniero comienza a operar un sistema neumático, el aire se introduce en un compresor y se fuerza a través de líneas a diferentes herramientas. El aire comprimido que entra en el sistema accionará pistones y ejes, obligándolos a moverse. Sin embargo. el aire comprimido es probablemente la forma de energía más costosa disponible en una planta, pero también es una fuente limpia, fácilmente utilizable, rápidamente disponible y segura.

## 2.3 Componentes Neumáticos

Todos los sistemas neumáticos utilizan aire comprimido para operar y mover piezas o actuadores. Estas son las partes comunes de un sistema neumático.

- Compresores
- Reguladores y manómetros.
- Acumulador o depósito
- Líneas de alimentación.
- Actuadores
- Válvulas Neumáticas

## 2.4. Compresores

Estas máquinas convierten el aire que respiramos en aire comprimido. Luego, el aire presurizado se utiliza en todo el sistema neumático. Por lo general, el compresor de aire es alimentado por un tanque de gas que fuerza el aire en el sistema para producir aire presurizado. Hay muchos tipos de compresores de aire disponibles para cumplir con la presión y el caudal de aire deseados. Los diferentes tipos de compresores de aire disponibles son de pistón, rotativos, centrífugos y de flujo axial. (Industria GSL, 2021)

Para una determinada aplicación debemos seleccionar un compresor que por lo menos aspire 1,5 a 2 veces el aire consumido en el circuito neumático. La otra variable decisoria para la elección del compresor es la presión de descarga que debe ser superior a la mínima necesaria para que los cilindros, motores, etc., hagan las funciones de mando y accionamiento. Para aplicaciones de automatización, tanto los caudales como las presiones son de tipo medio (García, 2020)..

Tradicionalmente, los compresores tienen velocidad fija, lo que significa que funcionan a una velocidad fija y constante, lo que produce una cantidad fija de aire comprimido por minuto. En muchos escenarios de producción del mundo real, es muy poco probable que se utilice la cantidad exacta de aire comprimido producido por un compresor de velocidad fija. Esto dará como resultado que el compresor funcione en condiciones de descarga, creando



aire comprimido que se desperdicia por completo. Y cuando la mayor parte de la energía perdida en una fábrica o planta proviene de sistemas de aire comprimido, vale la pena considerar opciones alternativas (Piccardo, 2017)

### 2.4.1 Tipos de compresores

Hay varias formas de clasificar los compresores de aire según los rangos de presión, la relación de presión, la capacidad, el diseño general y también según el principio de funcionamiento. En base a expertos se puntualizan los siguientes:

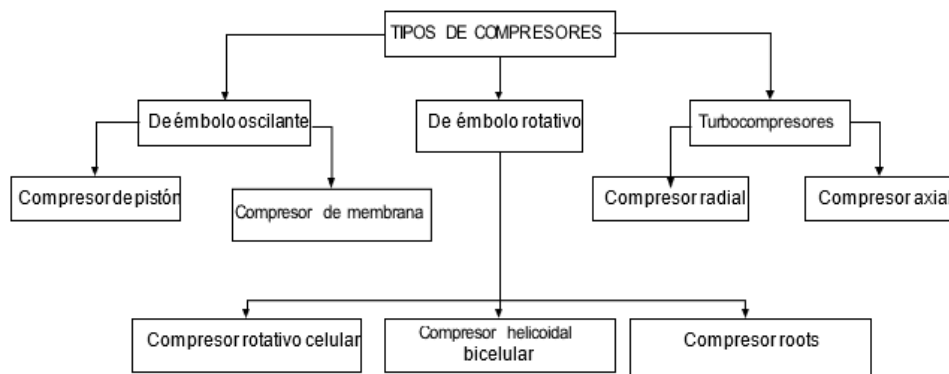


Figura 2. 5 Tipos de compresores  
Fuente. (García, 2020)

### 2.4.2 De émbolo oscilante

Estos compresores de aire de pistón basculante combinan los mayores volúmenes de aire de un compresor de paletas rotativas con las presiones más altas de una bomba de pistón. El diseño de pistón basculante permite que el tamaño total de la unidad sea mucho más pequeño y, sin embargo, ofrezca un alto rendimiento y una larga vida útil. Aireación ideal para estanques y lagos profundos que son demasiado profundos para los kits de compresores de aire de paletas rotativas. Véase la figura 2. 6..

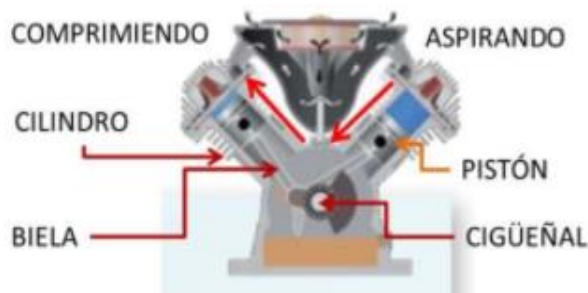


Figura 2. 6 Compresor de émbolo oscilante  
Fuente. (Copper Development Association Inc., 2019)

Se clasifican en:

1. Compresor de pistón
2. Compresor de diafragma o membrana

#### **2.4.2.1 Compresor de pistón**

Para entender el funcionamiento de un compresor de pistón es necesario saber los elementos que lo conforman y sus características. A continuación, se describe lo mencionado:

**Cigüeñal.** Al igual que en los motores, el corazón de un compresor de pistón se encuentra en su cigüeñal, un eje acodado con contrapesos que al aplicar el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular y uniforme. (Arsercobe, 2019)

**Pistones y Cilindros.** Los pistones son elementos formados por un vástago y un embolo, al generar un desplazamiento dentro de un cilindro reduce el volumen de un gas, generando el aumento en su presión, el movimiento de los pistones se produce por la acción de una biela unida a un cigüeñal, el cual es alimentando por un movimiento circular.

**Tipo de configuración.** La configuración hace referencia a la ubicación de sus cilindros, existen dos tipos: configuración en "V" y en "L", estas pueden varias según la presión requerida del equipo y el tamaño del mismo.

**Lubricados o exentos de aceite.** En el caso de los compresores exentos, la cámara de aspiración y compresión queda aislada de cualquier contacto con el lubricante del compresor, trabajando en seco y evitando que el aire comprimido se contamine con los lubricantes del equipo. (García, 2020)

**Simple o de doble efecto.** Esta característica hace referencia a la forma en la cual actúan los pistones, en un compresor de efecto simple los pistones comprimen el aire cuando se desplazan en una dirección específica, en compresor de doble efecto los pistones actúan en ambas direcciones.

**Una o dos etapas.** En compresores de una etapa los pistones actúan de una misma forma, en los compresores de dos etapas se separa la

compresión en dos fases; en la primera cierta cantidad de aire se comprime en un cilindro de baja presión, luego el aire sigue a otro cilindro el cual es comprimido a alta presión. (Arsercobe, 2019). Véase la figura 2.7.



Figura 2. 7 Compresor de pistón de 2 etapas  
Fuente. (Mundo Compresor, 2019)

#### **2.4.2.2 Compresor de diafragma o membrana**

Un compresor de diafragma es un tipo famoso de compresor de la categoría de compresores alternativos. El compresor de diafragma también se llama compresor de membrana. Un compresor de diafragma utiliza un diafragma rotatorio para comprimir el aire o el gas. El diafragma rotatorio ayuda a entregar el aire o gas dentro de la cámara de compresión y aplica la presión requerida para entregar el aire en el área deseada. Véase la figura 2.8



Figura 2. 8 Compresor de tipo diafragma  
Fuente. (Copper Development Association Inc., 2019)

### 2.4.3 Compresor de émbolo rotativo

Los compresores de émbolo rotativos están contruidos para operar mucho más tiempo sin reparaciones importantes. Funcionan mucho más fríos, tienen una mejor filtración y pasan menos aceite. Los compresores rotativos generalmente producen más aire por kW. Esto, además de su ciclo de trabajo del 100 por ciento, significa que a menudo puede usar una máquina rotativa de menor potencia en lugar de una de pistón, suelen presentar rotores de tres lóbulos y dos canales de preadmisión fundidos en la sección del cilindro del lado de descarga, lo que minimiza el sonido mediante la reducción de pulsaciones. Estos sistemas de soplantes se adaptan a una amplia gama de aplicaciones desafiantes, incluido el transporte sin aceite y la compresión de gases y aire. (TEC, 2020). Véase en la figura 2.9.

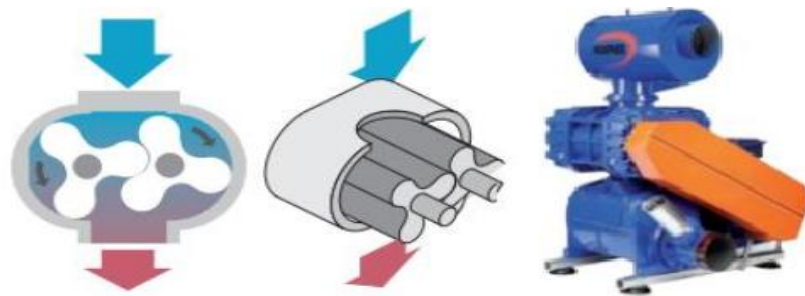


Figura 2. 9 Compresor de émbolo rotativo  
Fuente. (Mundo Compresor, 2019)

Los compresores rotativos pueden tener dos mecanismos de acción, con paletas o de excéntrica, también llamados de rodillo. En los compresores de paletas y de rodillo, la compresión se produce por la disminución del volumen resultante entre la carcasa y el elemento rotativo, cuyo eje no coincide con el eje de la carcasa (ejes excéntricos). En estos compresores rotativos no son obligatorias válvulas de admisión, ya que como el gas entra de forma incesante en el compresor la pulsación de gas es mínima (Posada & Villegas, 2017).

#### 2.4.3.1 Compresor de Paletas

Este tipo de compresor el eje motor es excéntrico respecto al eje del estator y concéntrico respecto al eje del rotor. El rotor gira deslizando sobre

el estator, con cinemática plana (radial), en forma excéntrica respecto a la superficie cilíndrica interior del estator, estableciéndose un contacto que en el estator tiene lugar sobre una única generatriz, mientras que en el rotor tiene lugar a lo largo de todas sus generatrices. (Fernandez, SF)

Estos pueden ser de tres tipos:

- Compresor tipo giratorio multicelular
- Compresor tipo giratorio bicelular
- Compresor volumétrico roots

#### 2.4.3.1 Compresor tipo giratorio multicelular

Un rotor excéntrico gira en el interior de un cárter cilíndrico provisto de ranuras de entrada y de salida. El rotor está provisto de un cierto número de aletas que se deslizan en el interior de las ranuras y forman las células con la pared del cárter. Cuando el rotor gira, las aletas son oprimidas por la fuerza centrífuga contra la pared del cárter, y debido a la excentricidad el volumen de las células varía constantemente (Fernandez, SF) y (García, 2020),

La figura 2.10 se aprecia un compresor rotativo multicelular y además una vista de los lóbulos

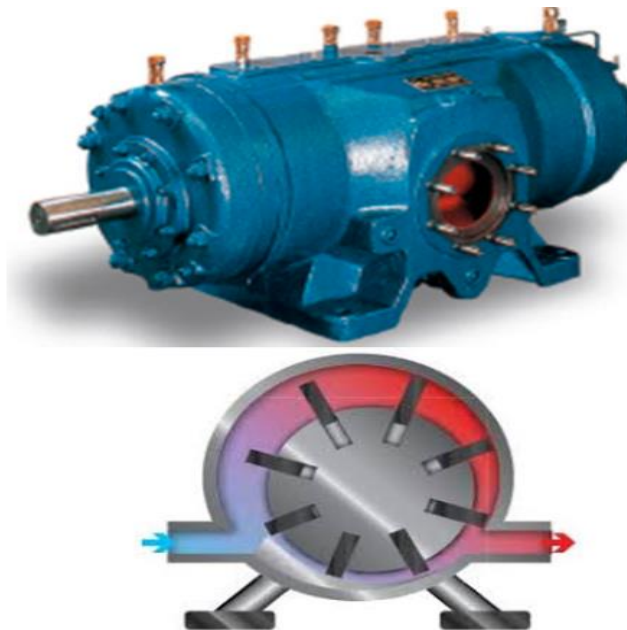


Figura 2. 10 Compresor rotativo multicelular  
Fuente. (Portal Electromecánico, 2017)

### 2.4.3.2 Compresor tipo giratorio bicelular:

Una máquina de producción de aire presurizado de este tipo es de simple operación, el aire entra en una cámara cerrada herméticamente donde dos rotores que giran en direcciones opuestas entre sí (contra rotativos) realiza el proceso de presurizado. Así los rotores se articulan y producen una reducción del volumen de aire que entró a su cámara (lado derecho de figura 2.11) de tal forma que luego se alcanzan niveles de presión que suele salir hacia el depósito de aire presurizado. Véase la figura 2.11

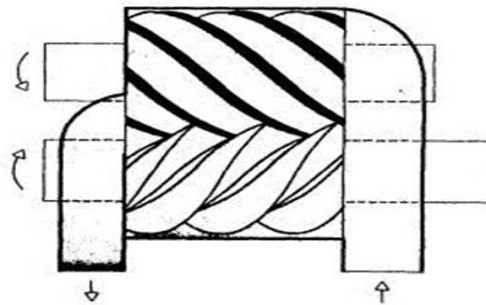


Figura 2. 11 Compresor rotativo bicelular  
Fuente. (Instrumentación Industrial , 2008)

### 2.4.3.3 Compresor volumétrico roots

Esta máquina de producción de aire presurizado tiene doble rotor o doble impulsor, los rotores puede tener a su vez 2, 3 y 4 lóbulos que giran en direcciones opuestas para que los lóbulos encajen. La compresión tiene lugar a un volumen aproximadamente constante. Véase la figura 2.12.



Figura 2. 7 Compresor Roots  
Fuente. (Mundo Compresor, 2019)

#### 2.4.4. Turbocompresores

Este tipo de compresores opera según el principio de la dinámica de los fluidos y son adecuados para grandes caudales. Pues, se fabrican dos tipos, que son, axial y radial.

El aire se pone en circulación por medio de una o varias ruedas de turbina. (García, 2020). Esta energía cinética se convierte en una energía elástica de compresión. Se encuentran dos tipos de ellos:

- Compresor radial
- Compresor axial

##### 2.4.4.1 Compresor radial:

El compresor radial o también llamado centrífugo, ofrece un espacio mayor al aire, el cual obliga a la disminución de la velocidad del flujo de aire, originando así una transformación de la presión existente dentro del compresor.

Mediante la rotación de los alabes, comunican energía cinética y dirigen el flujo radialmente hacia fuera, hasta encontrarse con la carcasa del mismo, que lo retorna al centro cambiando su dirección (García, 2020)..

Véase la figura 2.13

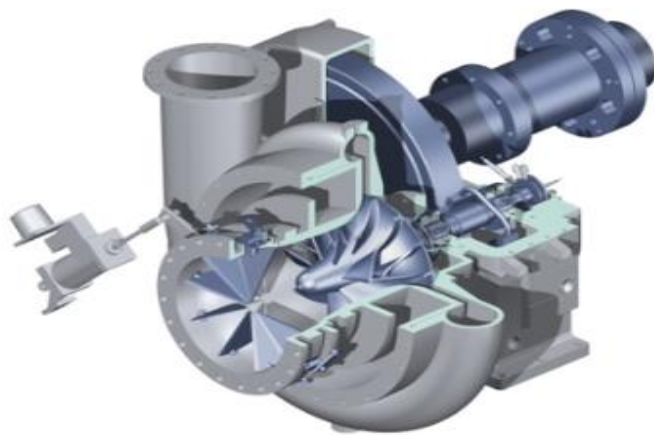


Figura 2. 8 Compresor radial o centrífugo  
Fuente. (Portal Electromecánico, 2019)

#### 2.4.4.2 Compresor Axial:

En este tipo de compresor, el flujo de aire es paralelo al eje o al árbol del compresor y no cambia de sentido como en los centrífugos de flujo radial. El compresor axial es un tipo de compresor que comprime continuamente el aire. Es un compresor rotativo basado en una superficie aerodinámica en el que el gas o el aire fluyen paralelos al eje de rotación.

Hay un conjunto de cuchillas giratorias y un conjunto de cuchillas estacionarias. Ambos tienen diferentes operaciones.

A medida que el compresor succiona el aire axialmente y aumenta su nivel de energía, el aire fluye a través de las palas del rotor que gira y ejerce un par de torsión en el aire. Después, las palas estacionarias disminuyen la velocidad del fluido y convierten el componente circunferencial del aire en presión, comprimiendo así el aire.

La figura 2.14 muestra la operación de un compresor tipo axial.

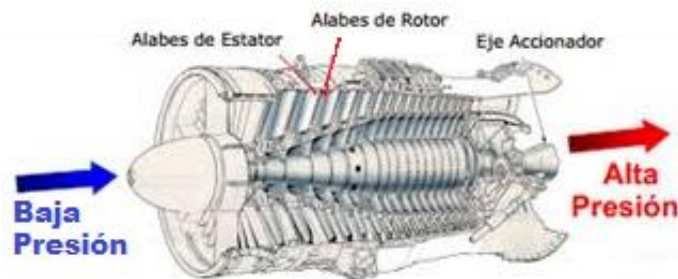


Figura 2. 9 Operación de un compresor axial  
Fuente. (Atlas Copco, 2016)

En esta clase de compresores la presión se produce en varias etapas. Se lo emplea en turbinas que están acopladas a un generador eléctrico. Los alabes o palas de la turbina se mueven con la entrada de aire mayormente del ambiente, esto se denomina baja presión, luego en una entrada transversal puede entrar un gas que produce combustión y este nuevo gas se presuriza alcanzando niveles de alta presión, lo necesario para girar o hacer mover las partes de un generador eléctrico. En centrales eléctricas tipo termo gas se emplean turbinas que tienen un compresor axial para absorber el aire del ambiente.



## **2.4 Auditoria energética en instalaciones de aire comprimido**

Una auditoría estándar consistiría en instalar registradores de datos durante un mínimo de 1 semana, incluidos los fines de semana, para capturar una variedad de demandas de producción diferentes antes de presentar una evaluación de ROI.

Todos los compresores están equipados con registradores de energía, así como un transductor de presión. Los registradores de datos recopilan y almacenan información relacionada con un sistema de aire comprimido:

- Presión
- Temperatura
- Punto de rocío de humedad
- Tasa de flujo

Además, los registradores de corriente y voltaje permiten registrar con precisión la corriente, los voltios, el factor de potencia y la potencia real de cada compresor de aire.

Todos los datos posteriores al período de tiempo se descargan para su análisis y se presentan en un informe detallado que describe las oportunidades de ahorro de energía. Esto no solo puede generar ahorros de energía y reducir sus emisiones de carbono, sino que también demuestra su responsabilidad ambiental (Torres, 2022)

Por datos estadístico, una planta industrial utiliza aire comprimido para un proceso o producción. El aire comprimido generado por el compresor con un rango de 5 a 50,000 Hp pierde aproximadamente 70 al 90% del aire comprimido, se desperdicia en forma de calor inutilizable. Por eso, los esfuerzos para aumentar la eficiencia energética de los compresores y los sistemas de aire comprimido se convierten en un objetivo importante en la industria o planta (Warent, Ernest et.al, 2010).

En la instalación y operación de los sistemas de aire comprimido, los costos energéticos son de lejos, los más elevados en que se debe incurrir a lo largo de la vida útil del sistema, a continuación, se muestran los costos típicos en % y en pesos de un compresor de aire de 100 HP durante cinco

años de operación, tres turnos 8760 Hr, \$450 / KW Hr. antes del Overhaul. La inversión inicial por adquisición de equipos es solo el 10%, mientras el consumo energético es el 77% del valor total del proyecto. Por esto las compras deben orientarse a la eficiencia energética de los equipos más que al valor de los mismos.

## **2.5 Diseño de una Red de Aire Comprimido**

Al iniciar el proceso de diseño de una instalación de aire comprimido (Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, 2014) se deben realizar un análisis de todos los equipos que requieren aire comprimido.

### **2.5.1 Parámetros de una RAC**

#### **2.5.1.1 Presión**

Se debe estimar la presión a la cual se quiere trabajar para determinar el funcionamiento del compresor y de la red. Generalmente una red industrial de aire comprimido tiene presiones de 6 a 7 bar.

#### **2.5.1.2 Caudal**

El caudal de aire comprimido es una magnitud que se establece según el planteamiento. Este puede ser igual a la capacidad del compresor y/o incrementado y debe ser suficientemente holgado, teniendo en consideración futuras expansiones en la planta.

El caudal de la red debe ser determinado en base a la demanda. Los dispositivos neumáticostraen en sus catálogos métodos para estimar su consumo.

Se puede relacionar el caudal ( $Q$ ) con la velocidad ( $v$ ), a través del área transversal del flujo ( $A$ ).

$$Q = v \cdot A \text{ Ecuación 1}$$

#### **2.5.1.3 Pérdida de presión**

Los componentes de una red de aire comprimido como codos, tes, cambios de sección, unidades de mantenimiento, y otras se oponen al flujo generado de presión. Garantizar que las pérdidas estén en los límites permisibles es

una labor esencial del diseño. Algunos valores generales se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Perdida de presión de algunos dispositivos.

<i>Dispositivos</i>	<i>Perdida (bar)</i>
<i>Secador adsorción</i>	<i>0.30</i>
<i>Separadores cerámicos</i>	<i>0.10</i>
<i>Red de tuberías</i>	<i>0.14</i>
<i>Filtros en general</i>	<i>0.15</i>

Fuente. El autor.

La caída de presión y la velocidad de circulación se encuentran relacionadas estrechamente. Cuanto mayor es la velocidad de circulación, mayor es la caída de presión; pero en la caída de presión también influyen otros factores como, la rugosidad de la pared interior de la tubería, la longitud de tubería y el número de accesorios instalados.

La ecuación para determinar la pérdida de carga es la siguiente:

$$hf_{(m)} = 10.67 \left( \frac{Q_{\left[\frac{m^3}{s}\right]}}{C} \right)^{1.852} \cdot \frac{L_{[m]}}{D_{[m]}^{4.87}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$h_{(m)}$  = Pérdida de carga

$Q$  = Caudal

$C$  = Coeficiente de rugosidad

$L$  = Longitud

$D$  = Diámetro

No obstante, la caída de presión no debe superar, en lo posible, el valor de 0,1 kg/cm<sup>2</sup> o 0.098 bares.

Otra opción para determinar la caída de presión es la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 3) el cual consta de un parámetro de factor de fricción, este se determina a través de la ecuación de Colebrook (Ecuación 4), donde combina los datos disponibles para flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas en una relación implícita:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

#### 2.5.1.4 Velocidad de circulación

Esta velocidad debe controlarse, ya que su aumento produce mayores pérdidas de presión.

La velocidad de circulación del aire comprimido en las tuberías debe estar comprendida entre 6 y 10 m/s. (Universidad Técnica del Norte, 2014)

#### 2.5.1.5 Temperatura

El aire comprimido es insensible a las variaciones de temperatura ya que garantiza un trabajo seguro, incluso a temperaturas extremas, aunque este sí influye en el cálculo de parámetros por tener una interdependencia entre el volumen específico y la presión. Si se modifica uno de esos factores automáticamente se alteran los otros, debido a que el flujo está en continuo movimiento, las moléculas poseen energía cinética que es la verdadera indicación de temperatura. Por tanto, el calor es la energía cinética de las moléculas. (Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, 2014)

Asimismo, es necesario analizar la temperatura del entorno de trabajo, y del lugar en donde está localizada. Así por ejemplo en una ciudad en la sierra como Cuenca, los veranos son frescos y nublados y los inviernos son cortos, fríos, secos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 7 °C a 17 °C y rara vez baja a menos de 5 °C o sube a más de 19 °C, tal como muestra en la figura 2.15.

La temporada templada dura 3,6 meses, del 15 de enero al 3 de mayo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 16 °C. El día más caluroso del año es el 1 de abril, con una temperatura máxima promedio de 17 °C y una temperatura mínima promedio de 10 °C.

La temporada fresca dura 2,6 meses, del 16 de junio al 4 de septiembre, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 13 °C. El día más frío del año es el 17 de agosto, con una temperatura mínima promedio de 7 °C y máxima promedio de 12 °C.

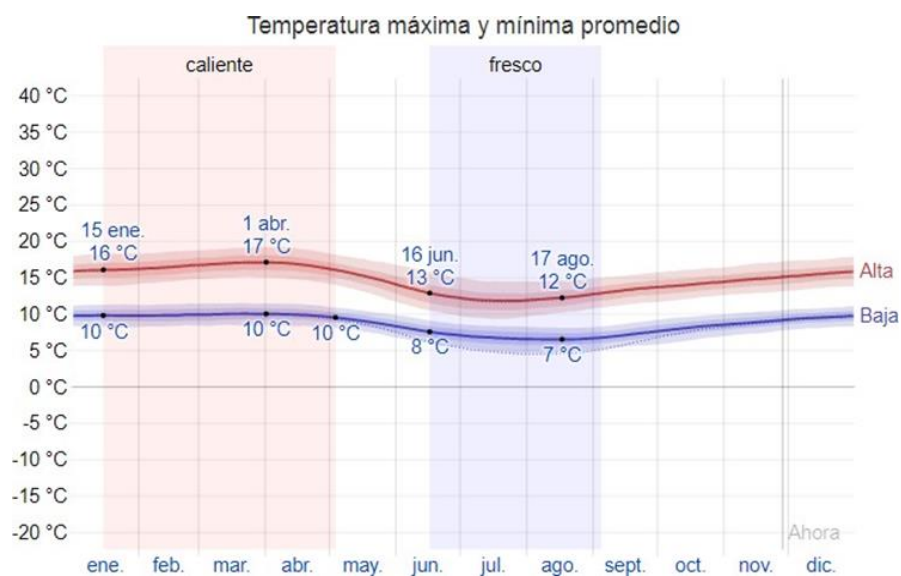


Figura 2. 10 Temperatura promedio en la ciudad de Cuenca.

Fuente. El autor.

Nota: La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario con las bandas de los percentiles 25º a 75º, y 10º a 90º. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

La temperatura en el ambiente laboral de la empresa es de 20°C, valor obtenido con la ayuda del termómetro el cual es un instrumento de medición de temperatura en el lugar endonde este situado.

## 2.5.2 Diseño de la tubería

La longitud de la tubería se establece a partir del trazado de la instalación y se debe tener en cuenta los accesorios instalados. Los fabricantes de compresores han desarrollado nomogramas para determinar con facilidad el diámetro de tubería más adecuado (Ver figura 2.16). Las tuberías de aire comprimido de instalación fija son accesibles, en la medida que sea posible, para facilitar la vigilancia o comprobación de la estanqueidad de la red, por lo que hay que evitarse su colocación empotrada en paredes. Las tuberías de alimentación horizontales deben ser colocadas con una pendiente del 1÷2% en el sentido de la circulación.

Las derivaciones verticales hacia abajo no tienen que terminar en la conexión para el consumidor, sino que deben prolongarse más, con el fin de que el agua de condensación producida se acumule en el punto más bajo y no pase al consumidor. Las tuberías que parten de la tubería principal deben derivarse siempre dirigiéndolas hacia arriba.

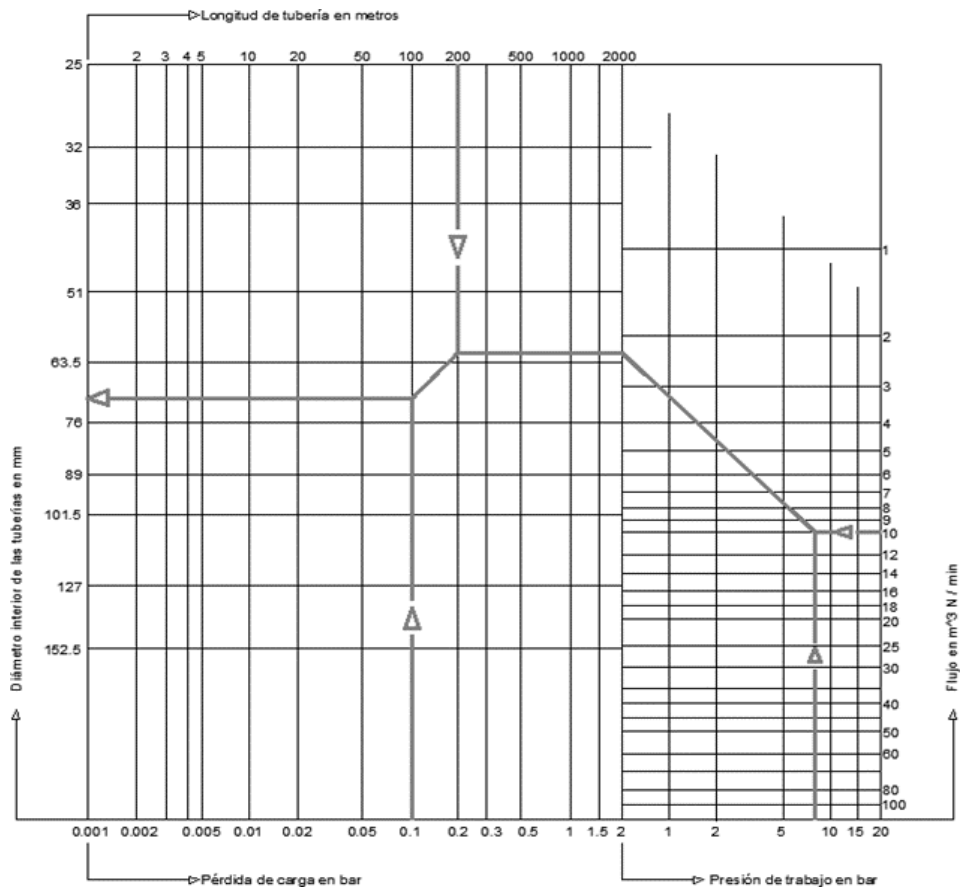


Figura 2. 11 Monograma para la determinación de los diámetros de la tubería.  
Fuente. El autor.

La determinación del diámetro correcto de la tubería mediante el uso del monograma de la figura 10 es en base a la intersección de la presión y el flujo de trabajo, una vez determinada esta intersección se le traza una línea oblicua de  $135^\circ$  el cual se aproxima a una línea horizontal que será determinada mediante la longitud de la tubería provocando una segunda intersección.

Una vez obtenida esta segunda intersección, se traza una línea oblicua de  $225^\circ$  provocando un tercer punto de unión con respecto a la pérdida de carga y finalmente mediante una línea horizontal hacia la izquierda se determina el diámetro correcto de la tubería basado en los factores de flujo, presión de trabajo, pérdida de presión y longitud de la tubería.

## **2.6 Factores en el diseño e instalación de la RAC**

La primera labor de diseño de una red de aire comprimido, consiste en levantar u obtener un plano de la planta, donde claramente se ubican los puntos de demanda de aire anotando su consumo y presión requeridas (Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, 2014). También identificar el lugar de emplazamiento de la batería de compresores. Además, es importante realizar una buena labor puesto que, una vez establecida la distribución, ésta influirá en las futuras ampliaciones y mantenimiento de la red.

Sin embargo, para el diseño de la red se recomiendan las siguientes observaciones:

1. Diseñar la red con base en la arquitectura del edificio y de los requerimientos de aire.
2. Lograr que la tubería sea lo más recta posible, con el fin de disminuir la longitud de tubería, número de codos, T's, y cambios de sección que aumentan la pérdida de presión en el sistema.
3. La tubería siempre debe ir instalada aéreamente. Puede sostenerse de techos y paredes. Esto, con el fin de facilitar la instalación de accesorios, puntos de drenaje, futuras ampliaciones, fácil inspección y accesibilidad para el mantenimiento. Una tubería enterrada no es un procedimiento práctico, ya que dificulta el mantenimiento e impide

la evacuación de condensados.

4. La tubería no debe entrar en contacto con los cables eléctricos y así evitar accidentes.
5. En la instalación de la red se debe tener en cuenta cierta libertad, para que la tubería se expanda o contraiga ante variaciones de la temperatura. Si esto no se garantiza es posible que se presenten “combas” con su respectiva acumulación de agua.
6. Antes de implementar extensiones o nuevas demandas de aire en la red, se debe verificar que los diámetros de la tubería soporten el nuevo caudal.
7. Un buen diámetro de la tubería principal evita problemas ante una ampliación de la red. La línea principal debe tener una leve inclinación en el sentido de flujo del aire para instalar sitios de evacuación de condensados.
8. Para el mantenimiento es esencial que se ubiquen llaves de paso frecuentemente en la red. Con esto se evita detener el suministro de aire en la red cuando se hagan reparaciones de fugas o nuevas instalaciones.
9. Todo cambio brusco de dirección o inclinación es un sitio de acumulación de condensados. Allí se deben ubicar válvulas de evacuación.
10. Las conexiones de tuberías de servicio o bajantes deben hacerse desde la parte superior de la tubería secundaria, para evitar el descenso de agua por gravedad hasta los equipos neumáticos y su deterioro asociado.

## **2.7 Softwares de simulación de una RAC**

Existen softwares de simulación de redes de tuberías por donde circulan distintos fluidos incluido aire comprimido, estos permiten calcular factores como, caída de presión, presión, caudal, entre otros. Algunos de estos Softwares se detallan a continuación:

**Pipe Flow:** Es un software de flujo tuberías utilizado por diseñadores de sistemas de tuberías e ingenieros hidráulicos. Calcula los caudales, las



caídas de presión de la tubería; el rendimiento de la bomba puede modelar sistemas de tuberías con múltiples puntos de suministro, tanques de descarga, componentes, válvulas y múltiples bombas en serie o en paralelo.

**Fluid Flow:** Es el software de referencia del mercado para cálculo de redes hidráulicas unidimensionales. Permite analizar cualquier fluido (compresible, incompresible, newtoniano, etc.), en cualquier régimen (estacionario, transitorio). Todo en un entorno gráfico simple, robusto e intuitivo. Además, permite la customización de capacidades adicionales no implementadas inicialmente en el software.

**Pumpsim:** Es un software diseñado para proporcionar una simulación visual 3D detallada de redes de tuberías y sistemas de bombeo, accionados por una interfaz de usuario completamente interactivas.

## 2.8 Mantenimiento

El propósito de los accesorios es mejorar la calidad del aire comprimido, entregado por el compresor para adaptar éste a las condiciones específicas de cada operación; algunos accesorios también se utilizan para la regulación de caudal y presión, lubricación de los equipos a instalar en la red o simplemente para cambios de direcciones en la red. Véase la figura 2.17.

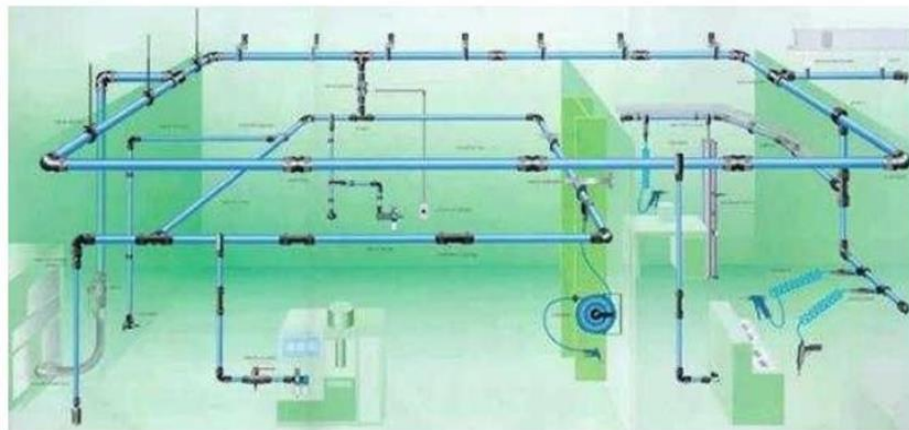


Figura 2. 12 Ejemplo de una red y sus accesorios  
Fuente. El autor

Adquirir un aire comprimido de buena calidad es importante para asegurar una larga vida útil de los equipos neumáticos y unos óptimos resultados en los procesos que requieren dicho servicio. Las características

más importantes son los siguientes:

- La cantidad de aceite que contiene el aire.
- La cantidad de agua presente en el mismo.
- El punto de rocío.

Cantidad de partículas extrañas contenidas en el aire. Además de las operaciones de purgado de condensaciones que se deben hacer frecuentemente, cada año, aproximadamente, debe hacerse una prueba y evaluación de las fugas, inspeccionándose grifos, purgas, derivaciones, etc., que permita su corrección con las reparaciones pertinentes.

Las redes secundarias de alimentación a máquinas y las tuberías de distribución dentro de ellas se efectúan por medio de los accesorios de conexasión que son muy variados y atienden a toda suerte de posibilidades.

## **2.9 Criterios de generación de aire comprimido**

### **2.9.1 Comprimir aire**

La mayoría de los compresores de aire utilizan impulsores centrífugos o tornillos rotativos para comprimir aire. Un compresor de aire aumenta la presión del aire de entrada al reducir su volumen. Por la misma física y termodinámica involucradas, comprimir aire es naturalmente ineficiente. La mayor parte de la energía eléctrica consumida por el motor que acciona el compresor de aire calienta el aire. Luego, el aire que sale del compresor debe enfriarse, lo que requiere un ventilador y un intercambiador de calor enfriado por aire o agua, lo que consume aún más energía (Instrumentación Industrial , 2008).

Una vez que el aire se comprime, debe entregarse a cierta presión al usuario final. A medida que se transporta el aire, se producen pérdidas y surgen ineficiencias en el camino. Al final de la línea, el aire comprimido a menudo se usa incorrectamente o para fines no previstos por el diseñador original.

La mayoría de los compresores de aire tienen, en esencia, impulsores centrífugos o tornillos rotativos (figura 2.18) que comprimen el aire.

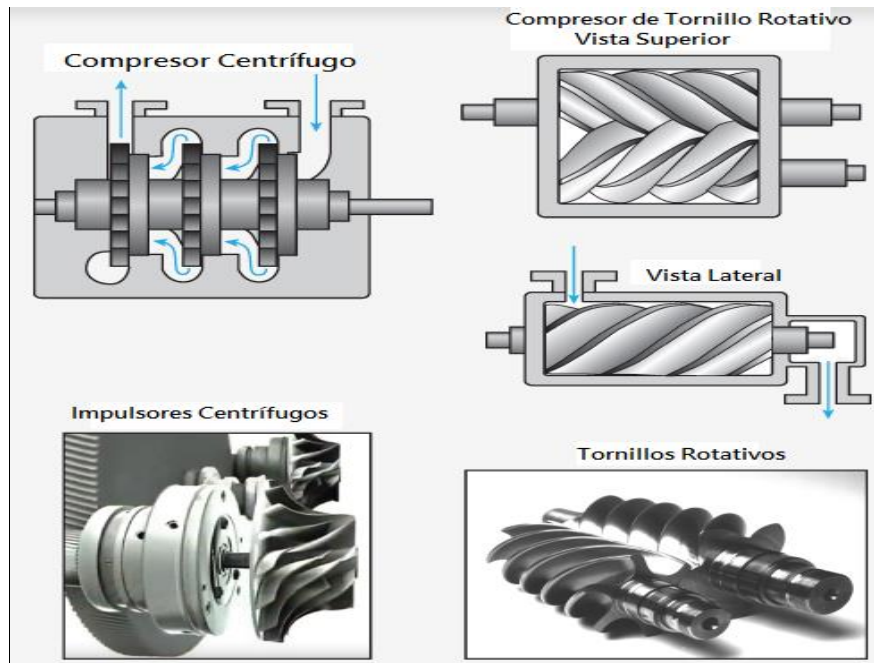


Figura 2. 13 Impulsores centrífugos (izquierda) o tornillos rotativos (derecha) para comprimir aire.  
Fuente. El autor

Al final, solo entre el 5% y el 10% de la entrada de energía original realiza un trabajo útil en los procesos de fabricación. La figura 2.19 desglosa el consumo de energía para una entrada de energía de 100 kW.

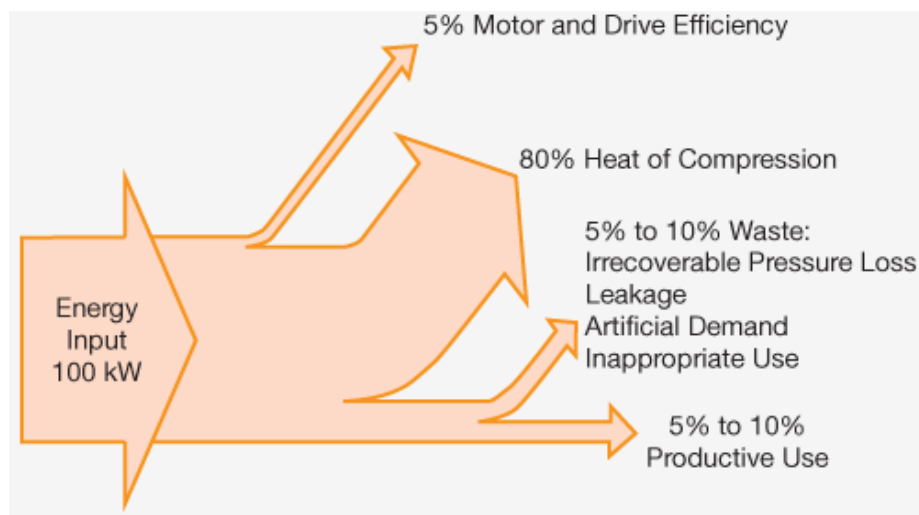


Figura 2. 19 Alrededor del 5 al 10 % de la entrada de energía se destina al uso productivo del aire comprimido.  
Fuente. El autor

Además de las ineficiencias inherentes a la física y la termodinámica de la compresión de aire, existen muchas otras ineficiencias del sistema.

$$\text{Costo} = \frac{(100 \text{ hp})(0.746 \text{ kW/hp})(8,760 \text{ h/año})(0.75 \text{ factor de carga})(\$0.075/\text{kWh})}{0.93 \text{ eficiencia del motor}} = \$39,526/\text{año}$$

Ejemplo de desglose de costos. Consideremos un compresor de aire de 100 hp que consume 0,746 kW por caballo de fuerza. Funciona durante 8.760 h/año (la planta funciona 24 h/día, 365 días al año), con un factor de carga del 75% (es decir, carga completa el 75% del tiempo) y una eficiencia del motor eléctrico del 93%. Si la energía cuesta \$0.075/kW en promedio, ¿cuál es el costo anual de hacer funcionar este compresor?

En números redondos, este compresor de aire de 100 hp costaría aproximadamente \$40,000/año solo por la electricidad. Una planta con 1.000 caballos de fuerza de compresores de aire operando en las mismas condiciones gastaría alrededor de \$400.000/año.

Para ayudar a que la compresión de aire sea algo más económica, considere configurar sus máquinas para que se apaguen cuando no se estén utilizando. Dependiendo de su patrón de turnos, apagar los compresores durante las noches y los fines de semana podría reducir significativamente sus facturas de energía.

La figura 2.19 muestra que la mayor parte de la energía gastada para hacer funcionar un compresor genera calor. Se puede recuperar hasta el 90 % del calor del aire comprimido para usos tales como precalentamiento de agua para calentadores de agua o calefacción suplementaria para edificios.

### **2.9.2 Mal uso del aire comprimido**

El mal uso del aire comprimido contribuye a la ineficiencia y los gastos involucrados. Los operadores en la planta pueden pensar en el aire comprimido como un producto gratuito y, usando su creatividad, pensar en todo tipo de cosas que hacer con él. El aire comprimido se usa en muchas aplicaciones, aunque un método diferente sería mucho más económico. Y, muchas aplicaciones se pueden realizar de manera más efectiva o más eficiente utilizando un método que no sea aire comprimido.

El aire comprimido se usa con frecuencia para eliminar el agua o la suciedad de las piezas fabricadas, de forma similar a como se usa un soplador de hojas para limpiar un camino de entrada. Estas limpiezas con aire comprimido, denominadas "soplados", generalmente incluyen una tubería o una manguera provista de aire comprimido que alimenta una o más salidas o boquillas. Los escapes son básicamente grandes fugas de aire.

Basado en el trabajo útil entregado, un motor de aire comprimido de 1 hp consume siete veces más energía que un motor eléctrico comparable de 1 hp. Por lo tanto, los costos eléctricos del uso de aire comprimido pueden ser significativamente mayores que los de un método alternativo, como muestran los siguientes dos ejemplos.

$$\text{Costo}_{PC-CA} = (5 \text{ agujeros})(\$1,000/\text{por agujero})(0.5 \text{ año}) = \$2,500/\text{año}$$

**Ejemplo 1: Refrigeración personal.** Se ha visto aire comprimido usado para enfriamiento personal en algunas plantas. En un caso, un trabajador en un área calurosa tomó una fuente de aire comprimido y dirigió la salida hacia sí mismo para mantenerse fresco (figura 2.20). Para calcular el costo de enfriamiento personal del aire comprimido, asuma:

- como regla general, un 1/8 pulg. agujero en una línea de aire comprimido de 100 psi cuesta \$1,000/año por la electricidad
- cinco 1/8 pulg. los agujeros se utilizan para la refrigeración personal
- la refrigeración personal se utiliza durante la mitad del año, en los meses calurosos.

$$\text{Costo}_{PC-EF} = \frac{(0.5 \text{ hp})(0.746 \text{ kW/hp})(4,380 \text{ h/año})(\$0.075/\text{kWh})}{0.825 \text{ eficiencia del motor}} = \$149/\text{año}$$

En comparación, para calcular el costo de un ventilador eléctrico para enfriamiento personal, asuma:

- un motor de ventilador de 0,50 hp
- el motor es 82.5% eficiente
- el motor tiene un factor de conversión de 0,746 kW/hp
- el ventilador funciona durante la mitad del año, 4380 h/año
- la electricidad cuesta \$0.075/kWh.

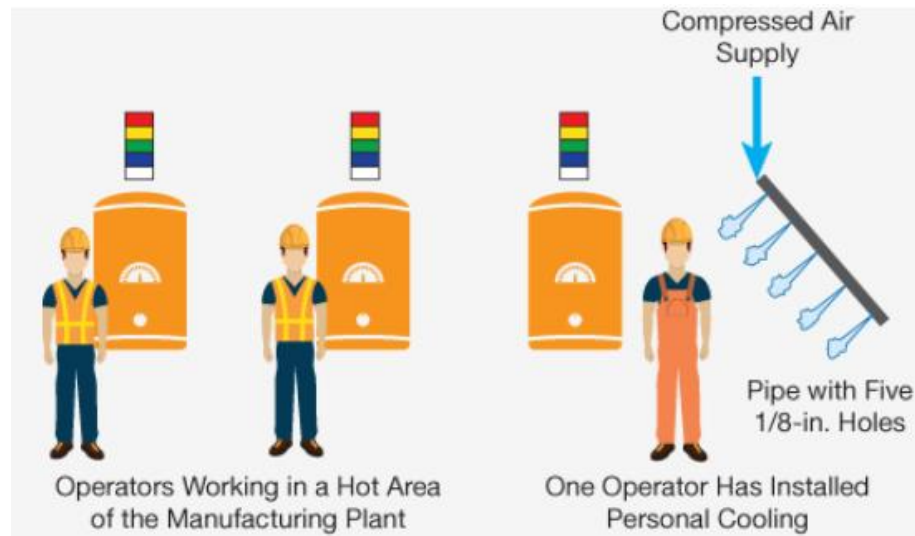


Figura 2. 14 Refrigeración personal de un trabajador

Fuente. El autor

Nota: El uso de aire comprimido para enfriamiento personal le costará a la planta de ejemplo \$2,500/año en promedio. En comparación, usar un ventilador eléctrico para enfriar costará solo alrededor de \$ 150 por año.

El costo de la energía eléctrica para la refrigeración personal con aire comprimido es casi 17 veces superior al de la refrigeración con ventilador eléctrico.

$$Costo_{BO-CA} = (5 \text{ agujeros})(\$1,000/\text{por agujero})(1\text{año}) = \$5,000/\text{año}$$

**Ejemplo 2: Soplado.** Los sopladores se utilizan con frecuencia para eliminar la humedad o los residuos de las piezas durante el proceso de fabricación (véase la figura 2.21). Para calcular el costo de una purga con aire comprimido, asuma:

- como regla general, un 1/8 pulg. agujero en una línea de aire comprimido de 100 psi cuesta \$1,000/año por la electricidad.
- cinco 1/8 pulg. los agujeros se utilizan para el soplado.
- el soplado está en funcionamiento en todos los turnos, todo el año.

$$Costo_{BO-LPB} = \frac{(2 \text{ hp})(0.746 \text{ kW/hp})(8,000 \text{ h/año})(\$0.075/\text{kWh})}{0.825 \text{ eficiencia del motor}} = \$1,085/\text{año}$$

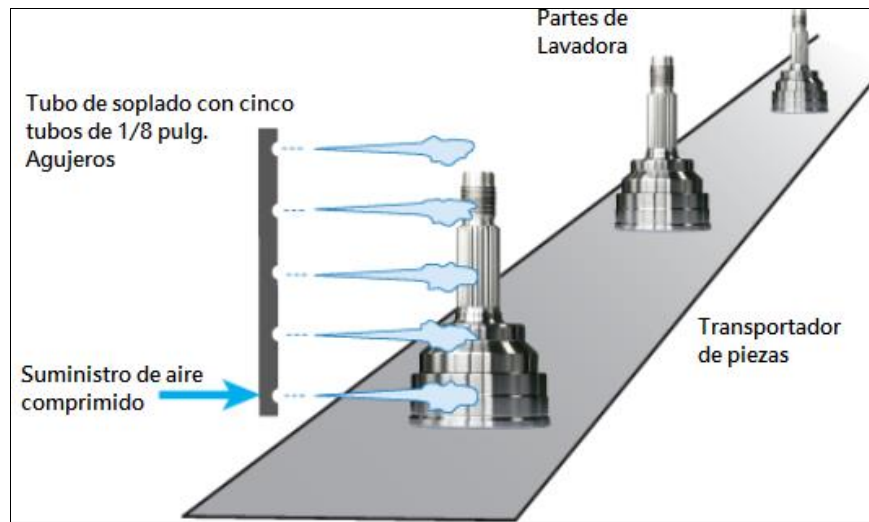


Figura 2. 15 Soplado durante el proceso de fabricación.

Fuente. El autor

Nota: El uso de aire comprimido para soplar una parte le costará a esta planta \$5,000/año. Sin embargo, usar un soplador de baja presión solo le costará a la planta \$1,085/año.

Existen alternativas al uso de aire comprimido para el soplado de piezas. Un pequeño ventilador de baja presión es suficiente y mucho más económico. En comparación, para calcular el costo de un soplador de baja presión para una purga, asuma:

- un motor soplador de baja presión de 2 hp.
- el motor es 82.5% eficiente.
- el motor tiene un factor de conversión de 0,746 kW/hp.
- el soplador funciona casi todo el tiempo, 8000 h/año
- la electricidad cuesta \$0.075/kWh.

El costo de energía eléctrica para el soplado con aire comprimido es algo más de 4,5 veces superior al de un soplador de baja presión. Está claro a partir de estos dos ejemplos que es mucho más económico usar dispositivos accionados eléctricamente directamente que aire comprimido siempre que sea posible.

En la tabla 2.2 se enumera algunos otros posibles usos indebidos del aire comprimido y sugiere alternativas.

Tabla 2. 2 Usos indebidos del aire comprimido y las alternativas sugeridas

<b>Usos potencialmente inapropiados</b>	<b>Alternativas sugeridas</b>
<b>Limpieza, secado, refrigeración de procesos</b>	Sopladores de baja presión, ventiladores eléctricos, escobas, boquillas diseñadas
<b>Aspersión</b>	Sopladores y mezcladores de baja presión
<b>Aspiración, atomización</b>	Sopladores de baja presión
<b>Relleno</b>	Sopladores de baja a media presión
<b>Generador de vacío</b>	Bomba de vacío dedicada o sistema de vacío central
<b>Enfriamiento personal</b>	Ventiladores eléctricos
<b>Enfriadores de vórtice operados por aire comprimido de tubo abierto sin termostatos</b>	Intercambiador de calor aire-aire o acondicionador de aire; agregue termostatos al enfriador vortex
<b>Mezclador accionado por motor neumático</b>	Mezclador con motor eléctrico
<b>Bombas neumáticas de diafragma</b>	Regulador adecuado y control de velocidad; bomba eléctrica
<b>Equipo inactivo</b>	Coloque una válvula de corte de aire en la entrada de aire comprimido.
<b>Equipo abandonado</b>	Desconecte el suministro de aire al equipo.

Fuente. El autor

## 2.10 Indicador de Fuga

Los detectores de fugas son excelentes herramientas para encontrar fugas de aire comprimido, pero aún requieren que una persona camine alrededor de la planta. Una de las formas más sencillas de determinar el porcentaje de fuga es mirar el uso de aire comprimido y/o el caudal en los momentos en que la planta no está funcionando y dividirlo en el caudal de producción promedio. Por ejemplo, durante las pausas para el almuerzo, después del horario laboral y durante los fines de semana. El software moderno de administración de energía tiene algoritmos de detección incorporados que calculan esto automáticamente, para que pueda tomar su descanso para almorzar sin tener que mirar.

Fuga = [Flujo total durante el tiempo de inactividad]/ [Flujo total durante la producción] \*100 %

También tiene sentido, por ejemplo, comparar el flujo de aire antes y después de realizar el trabajo de mantenimiento, para que pueda ver el resultado financiero de una acción de reparación instantáneamente.



Multiplique las fugas por el total de horas de funcionamiento y costos, para proyectar los costos totales de fugas sobre una base anual.

Dado que el porcentaje de fuga es un número relativo, la precisión absoluta del medidor de flujo es menos importante. Siempre que tenga un sensor estable y confiable con una salida de señal lineal, siempre puede calcular el porcentaje. El valor absoluto es irrelevante si el sensor es estable. Una reducción del cuatro por ciento (4 %) en el flujo en el cabezal principal significa una reducción de energía del 4 %, si el controlador maestro puede mantener los compresores funcionando al mismo nivel de eficiencia. Además, el rango dinámico del medidor de flujo es importante, por lo que no se deben usar medidores de flujo de vórtice ni medidores de presión diferencial para esta aplicación. La masa térmica tiene una capacidad de rango superior que permite detectar fugas correctamente.

## CAPÍTULO 3: AUDITORÍA ENERGÉTICA A COMPRESORES

A continuación se detalla el levantamiento de datos de placas características de banco de compresores y equipos para tratamiento primario de aire comprimido en la zona de rendering de aves. El rendering es el proceso que convierte los desechos de carne o de pescado en sustancias aptas para alimentación animal. Esto puede ser un alimento en forma de pellet o tipo granos de balanceado.

Desde un punto de vista ambiental y económico significa convertir residuos peligrosos (separa componentes de agua, grasa y proteína, incluyendo sangre, huesos y vísceras de carne y con ello generar subproductos con valor comercial: harina de vísceras, sebo y harina de sangre) para la salud y caros de gestionar en un valioso componente para piensos compuestos y otras industrias.

### 3.1 Datos de Placa de los Compresores

#### Compresor – Zona Rendering

Tabla 3. 1 Compresor – Zona Rendering

Marca	<b>Gardner Denver</b>
Potencia del motor	30HP/22.37kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.89
Presión de trabajo	100PSI - 115 PSI
Caudal Teórico	135 CFM (3.82 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 2 Compresor – Zona Rendering

Marca	<b>Ingersoll Rand SSR UP6-15-125</b>
Potencia del motor	15HP/11.18 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.85
Presión de trabajo	100 PSI-110 PSI (8.6Bar)
Caudal Teórico	65 CFM (1.84 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 3 Compresor – Zona Rendering

Marca	<b>Ingersoll Rand U20H-SP</b>
Potencia del motor	20HP/14.9 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.85
Presión de trabajo	100 PSI – 115 PSI
Caudal Teórico	77 CFM (2.18 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

### Compresor – Planta Aves (Compresor 1,2,3,4)

Tabla 3. 4 Compresor 1 – Planta Aves

Marca	<b>BOGE S40-2</b>
Potencia del motor	40HP/30 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.86
Presión de trabajo	111 PSI - 120 PSI (8.6Bar)
Caudal Teórico	183 CFM (5.18 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 5 Compresor 2– Planta Aves

Marca	<b>Ingersoll Rand SSR-EP20SE</b>
Potencia del motor	20HP/14.9 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.85
Presión de trabajo	109 PSI - 115 PSI (8.6Bar)
Caudal Teórico	77 CFM (2.18 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 6 Compresor 3– Planta Aves

Marca	<b>Ingersoll Rand SSR-20SE</b>
Potencia del motor	20HP/14.9 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.85
Presión de trabajo	109 PSI - 115 PSI (8.6Bar)
Caudal Teórico	79 CFM (2.23 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 7 Compresor 4– Planta Aves

Marca	Ingersoll Rand EP20-ESP
Potencia del motor	20HP/14.9 kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.85
Presión de trabajo	105 PSI - 115 PSI (8.6Bar)
Caudal Teórico	72 CFM (2.038 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

### 3.2 Datos Tanques Pulmones

La tabla 3.8 muestra los datos de los tanques de pulmones 1,2 y 3.

Tabla 3. 8 Datos de tanques Pulmones

- Datos Tanque <b>Pulmón 1</b> (para planta de producción de aves)	
Capacidad de acumulación	= 1250 litros (Aprox.)
- Datos Tanque <b>Pulmón 2</b> (para Rendering-bombas soplado visceras)	
Capacidad de acumulación	= 500 litros (Aprox.)
- Datos Tanque <b>Pulmón 3</b> (para Rendering -desechos)	
Capacidad de acumulación	= 4000 litros (Aprox.)

Fuente. El autor

Estos dos tanques pulmón están conectados en serie con una tubería de aluminio de 2"

### 3.3 Red de distribución de aire comprimido

Se muestra en la tabla 3.9 datos de distribución del aire comprimido

Tabla 3. 9 Datos de red de aire comprimido

<b>Red de distribución de aire comprimido – Zona Rendering = Abierta</b>
<b>Diámetro de tubería = 2.5"</b>
<b>Red de distribución de aire comprimido – Planta de producción = Cerrada</b>
<b>Diámetro de tubería = 2.5"</b>

Fuente: El autor

### 3.4 Diagrama de conexión actual

En base a una inspección visual de conexiones de equipos de generación de aire comprimido junto con la red de distribución se elabora un diagrama de dicha etapa.

#### 3.4.1 Diagrama actual de compresores – Zona Rendering



Figura 3. 1 Diagrama actual de compresores  
Fuente. El autor

### 3.5 Configuración de compresores

En la figura 3.2 se muestra la elaboración del diagrama o la configuración de los compresores para la planta. Se especifica la tubería y conexión en serie de los 4 compresores que envían un caudal de aire comprimido que llenará un tanque pulmón. Entonces el aire comprimido fluye desde el tanque pulmón hacia dispositivos de tratamiento primario de aire comprimido (secadores, enfriadores etc.). Luego el aire a través de la red de distribución llega a herramientas o máquinas neumáticas, esto último representa el consumo de caudal o demanda del aire presurizado

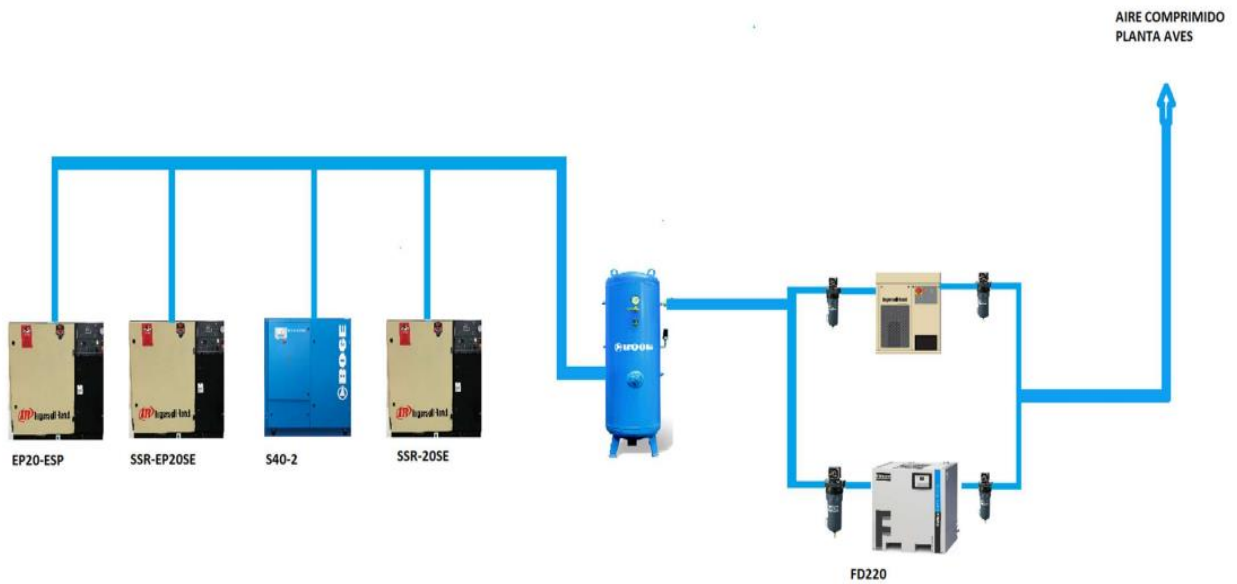


Figura 3. 2 Configuración de compresores para la planta de producción de aves  
Fuente. El autor

### 3.6 Metodología de medición

Para adquirir las diferentes mediciones con este programa se instala un detector electrónico presión en el depósito o tanque pulmón y un amperímetro de gancho a la entrada de la alimentación de voltaje del compresor, esto quiere decir, en una de las líneas de fase, así el consumo de aire comprimido del compresor es registrado y estimado.

A continuación, se procede con la generación de un registro del consumo del aire presurizado por día, mientras el compresor está operando. El registro gráfico contiene el tiempo de trabajo del compresor y una gráfica del consumo energético.

La gráfica del consumo energético proporciona detalles, como:

- El trabajo del compresor junto con el respectivo consumo energético de electricidad
- Asimismo, estima los precios o coste de producir aire comprimido en la planta

### 3.6.1 Mediciones en compresores

Se inspeccionará la instalación o sistema de aire comprimido para evaluar los siguientes parámetros

- La cantidad de compresores a ser auditados
- Determinar el caudal en m<sup>3</sup>/min de cada equipo compresor
- Medir la presión neta de trabajo.
- Verificar la instalación correcta de los sensores a la data logger junto con la medición de amperios o consumo energético.

### 3.6.2 Procedimiento para el registro de datos con Aireport

La marca alemana BOGE, ha introducido el software AIReport, el cual es un sofisticado sistema de auditoría de aire comprimido. Por consiguiente, AIReport ayuda a detectar puntos débiles durante el monitoreo a largo plazo a mejorar evidentemente los sistemas de aire comprimido. El parámetro fundamental de la eficacia de una estación de producción de aire comprimido es su consumo de energía. El software puede analizar a la vez hasta 12 compresores. El análisis en gráficos y tablas de resúmenes muestran datos registrados e identificarán no sólo consumos de caudal, presión sino hasta de ahorro de aire comprimido. Por lo tanto, se puede hacer a un sistema de aire comprimido optimizado y reducido en los costos de energía (BOGE, 2019) (García, 2020).

El Datalogger BOGE es dispositivo que registra los datos de medición en tiempo real, este equipo es fundamental en la auditoria energética. (Torres, 2022). Véase en la figura 3.3

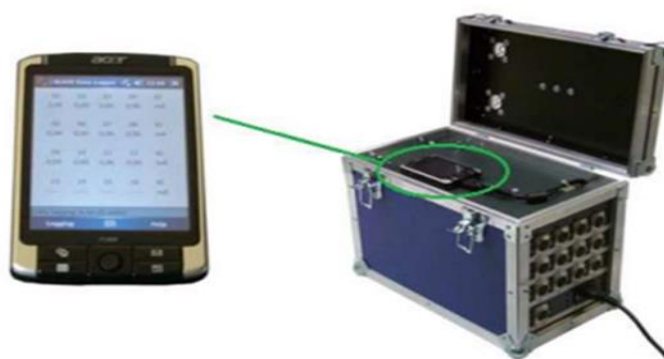


Figura 3. 3. Equipo de registro BOGE  
Fuente. (BOGE, 2019)

### 3.6.3 Conexión de la pinza amperimétrica

La medición se realiza en una fase del compresor, la pinza amperimétrica se conecta a un dispositivo tal como se visualiza en la figura 3.4. La salida del dispositivo Adaptador de corriente es de 4-20 Ma, con una sensibilidad de 1mA/A, este debe conectarse a las entradas analógicas de la caja de medición. (García, 2020).

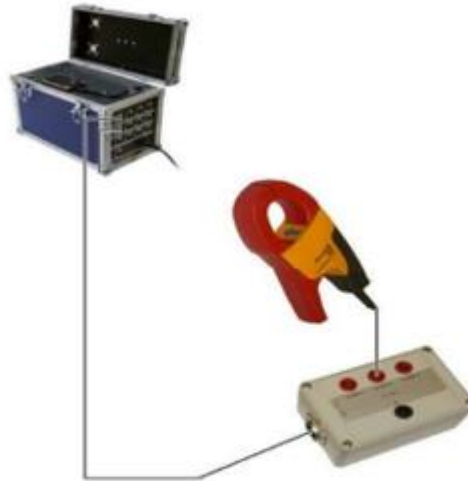


Figura 3. 4 Conexión del data logger  
Fuente: (BOGE, 2019)

### 3.6.4 Constitución de la auditoría

Según la normativa ISO una auditoría instituye los pasos siguientes:

1. Determinación del gasto total (consumo) de aire comprimido en m<sup>3</sup>/min.
2. Expresar la presión de operación en valores máximos y mínimos (medidos en bars).
3. Elaboración de esquemas de consumo del aire presurizado en m<sup>3</sup>/min por día de operación.
4. Determinar el % de trabajo total del compresor en horas.
5. Determinar el % de trabajo del compresor en carga mientras dure la auditoría en la planta
6. Determinar el % de trabajo del compresor en vacío mientras dure la auditoría en la planta.
7. Medir consumo energético del compresor en Kwh en carga.
8. Medir consumo energético del compresor en Kwh en vacío.



9. Cuantificar (número de veces) la operación del motor principal del compresor cuando se enciende.
10. Calcular el promedio anual de producción de aire presurizado en m<sup>3</sup>
11. Calcular el costo energético total al producir aire presurizado

En cumplimiento de los pasos enunciado se evalúan 24 horas de operación del compresor, así se efectúan mediciones en el día de más consumo de aire presurizado. Para establecer una lectura adecuada del diagrama de presión, en primer lugar, se crea el diagrama óptimo de cómo deben funcionar el compresor de velocidad variable. Véase la figura 3.5.

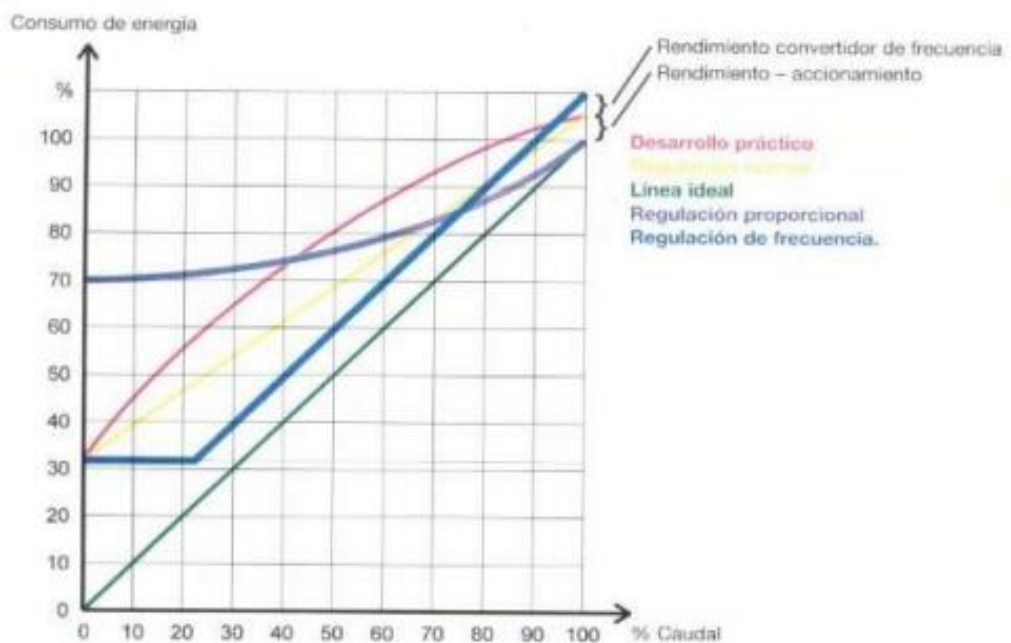


Figura 3. 5 Relación de funcionamiento de las diferentes formas de control en compresores de tornillo

Fuente. (Copper Development Association Inc., 2019)

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DEL AIRE COMPRIMIDO

### 4.1 Determinación del consumo total de la planta

Se especifican las gráficas obtenidas por el consumo de aire comprimido en una semana de mediciones. En la figura 4.1 se observa el consumo de aire comprimido en las siguientes fechas 25/07/2022 - 30/07/2022

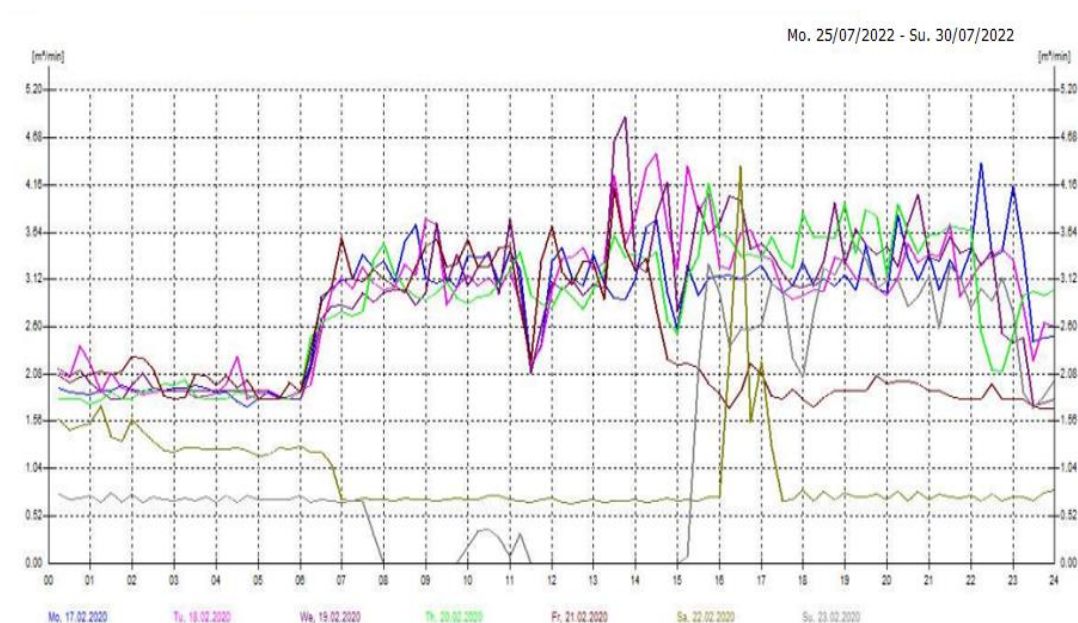


Figura 4. 1. Consumo Total de la Planta de los siete días auditados.  
Fuente: El autor

En la figura 4.1 se muestra el consumo total de la Planta de los siete días auditados, de tal manera que se registran datos que servirán para comparar según las normativas. La figura 4.1 indica información importante y se puede estimar de cómo se comporta el consumo de la planta cada día en todo el año.

Se aprecia que desde las 6H00 hasta las 23H00 se produce más solicitud de aire presurizado, sin embargo, se observan variaciones en ese tiempo transcurrido. En los días laborables de lunes a viernes desde las 23H30 hasta las 06H00 se aprecia que existe una baja demanda, es decir se presenta un caudal de aire comprimido de  $2 \text{ m}^3/\text{min}$ . También se aprecia un punto medio de consumo repetitivo que se ubica en alrededor de  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ . Se observa además un punto máximo de consumo de  $5 \text{ m}^3/\text{min}$ . Los días sábado y domingo se descubre un consumo muy bajo de  $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ .

## 4.2 Determinación del consumo energético total

En la figura 4.2 se aprecia el consumo eléctrico total, 3197 kWh en valores de porcentaje, el 93%, se determina que fue consumo energético en carga y el 7% (239 kWh) consumo energético en vacío, en los 7 días de mediciones

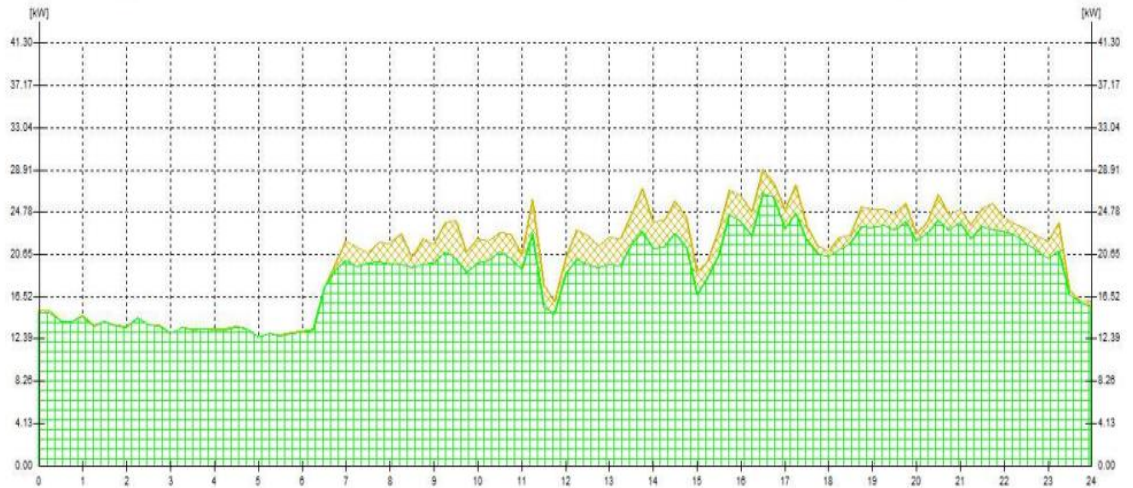


Figura 4. 2. Consumo energético total  
Fuente. El autor

### 4.2.1 Detalle de operación en carga y vacío

En la tabla 4.1 se puede apreciar la siguiente información:

El **compresor 1 LRS23-29D** tiene una capacidad de generación de 130.6 CFM (3.5 m<sup>3</sup>/min), un consumo instantáneo de 31.20 kW en carga y 9.4kW en vacío. Según las mediciones el compresor estuvo operativo el 87.93% del tiempo auditado, trabajando el 98.38% en carga y el 1.62 % en vacío.

El **compresor 2 SSR JP6-15-125** tiene una capacidad de generación de 63.56 CFM (1.8 m<sup>3</sup>/min), un consumo instantáneo de 11.62 kW en carga. Los resultados de las mediciones al compresor indican que estuvo operativo el 28.34% del tiempo auditado, trabajando el 18.16% en carga y el 81.84 % en vacío.

El **compresor 3 U20 H-5P** tiene una capacidad de generación de 74.16CFM (2.1 m<sup>3</sup>/min), un consumo instantáneo de 17 kW en carga. Se registra que el compresor estuvo operativo el 3.16% del tiempo auditado, trabajando el 6.43% en carga y el 93.57 % en vacío. Mientras el **compresor 1** enciende o arranca 182 veces durante el tiempo auditado y tiene 181 ciclos

de Carga/Vacío con un consumo energético total de 3099.64 kWh generando 22312 m<sup>3</sup> a un costo Total de 309.06 dólares. El **compresor 2** arranca 160 veces durante el tiempo auditado y tiene 309 ciclos de Carga/Vacío con un consumo energético total de 304.26 kWh generando 933 m<sup>3</sup> a un costo Total de 30.43 dólares.

El **compresor 3** arranca 33 veces durante el tiempo auditado y tiene 20 ciclos de Carga/Vacío con un consumo energético total de 31.98 kWh generando 44 m<sup>3</sup> a un costo Total de 3.2 dólares.

Tabla 4. 1. Detalle de consumo (caudal) aire presurizado

Compressor Data (Measurement Mo. 25/07/2022 - Su. 30/07/2022)												
CH	Compressor	Output [m <sup>3</sup> /min]		[kW] Loaded		No-load	Audit Time	Time Run	Loaded		Unloaded	
		min	max	min	max	[kW]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]
1	LRS23-29D	1.2	3.7	9.40	31.20	3.57	167:50:41	67.93	145:11:50	96.38	02:23:30	1.62
2	SSR UPR6-15-125		1.6		11.02	5.24	167:50:41	29.35	06:38:30	18.16	38:56:10	61.84
3	U20H-5P		2.1		17.00	5.27	167:50:41	3.16	00:20:30	6.43	04:58:10	93.57

Measured Data (Measurement Mo. 25/07/2022 - Su. 30/07/2022)										
CH	Compressor	Motor		Total Power [kWh]			Total Air m <sup>3</sup>	Costs [\$]		
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Total		Loaded	Unloaded	Total
1	LRS23-29D	162	181	3,090.04	8.55	3,099.19	22,312.0	309.06	0.00	309.62
2	SSR UPR6-15-125	160	309	100.38	203.88	304.26	933.0	10.94	20.39	30.43
3	U20H-5P	33	20	5.61	26.17	31.98	44.0	0.56	2.62	3.20

Fuente. El autor

#### 4.2.2 Detalle de consumo energético

Tabla 4. 2 Resumen de consumo en KW por parte de compresores

Audit Time		167:50:41	[hh:mm:ss]
Compressed Air Consumption		23,289	[m <sup>3</sup> ]
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	3,197	239	3,438 [kWh]
Load / Unload Run	93.0	7.0	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1373	-	0.1475 [kWh/m <sup>3</sup> ]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	2.3	0.0	5.2 [m <sup>3</sup> /min]
Power Consumption	17.4	0.0	39.2 [kW]
Net Pressure	7.7	6.0	8.3 [bar]
System Utilisation	30.4	0.0	68.4 [%]

Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	1,215,478 [m³/a]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	320.-	24.-	344.- [\$]
Energy Costs Per Annum	18,701.-	1,283.-	17,954.- [\$]
Energy Costs Per m³	0.0148 [\$/m³]		

Fuente. El autor

En esta tabla 4.2.2 se resume que el consumo energético generaría 1,215.478 m³/año a un costo total de 17954.00 dólares, teniendo en cuenta que se gastaría 0,0148 dólares por cada metro cúbico generado.

### 4.3 Verificación del día con más consumo

#### 4.3.1 Caudal, Presión, Carga y Vacío

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se pueden observar los días de mayor consumo. Se puede notar que el lunes hay más consumo.

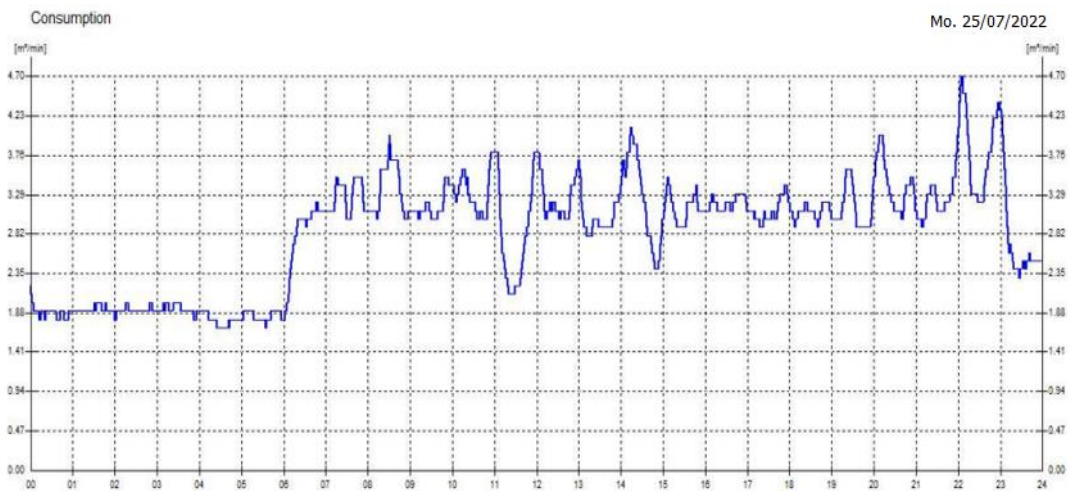


Figura 4. 3. Medición de consumo de caudal

Fuente. El autor

La figura 4.3 muestra que el punto de mayor consumo se registra aproximadamente a las 22:00 y se aproxima a 4.7 m³/min. En la parte inferior se observa el comportamiento de los compresores.

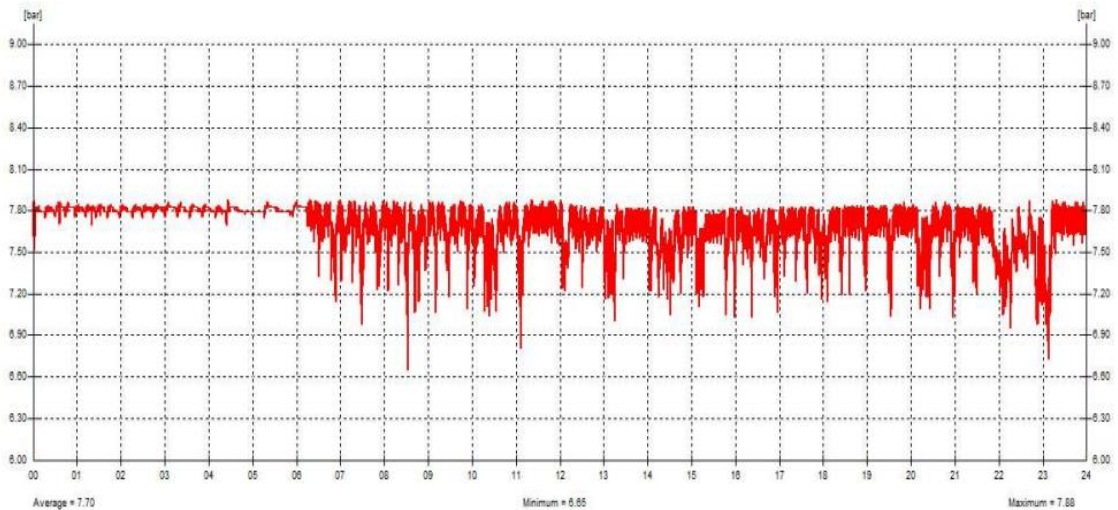


Figura 4. 4 Medición del consumo de presión  
Fuente. El autor

En la figura 4.4 se observa la variación de la presión de la red que oscila entre una presión mínima de 6.8 bar y una presión máxima de 7.9 bar.

La variación de la presión está directamente relacionada con la variación de la demanda de aire comprimido en la zona Rendering.

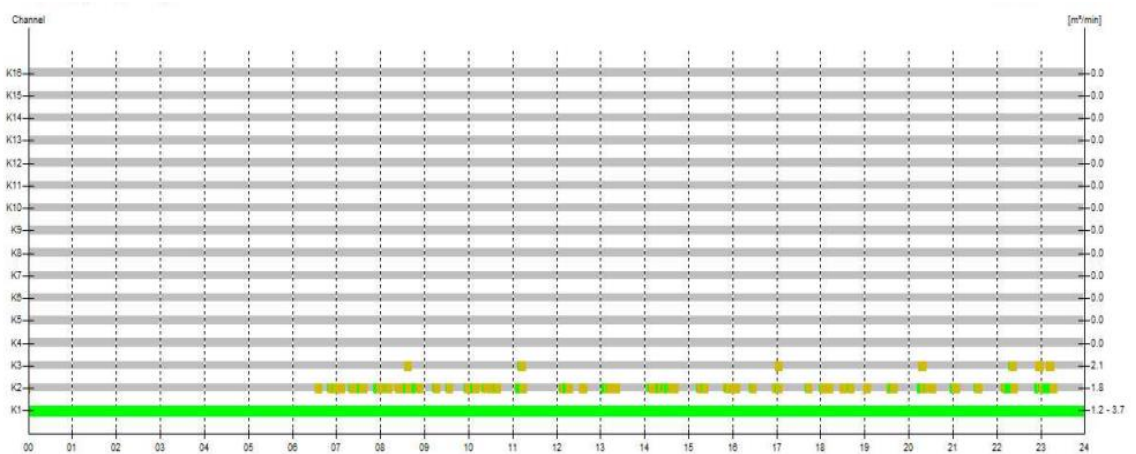


Figura 4. 5 Comprobación de carga y vacío  
Fuente. El autor

En la figura 4.5 muestra únicamente el consumo de aire en la planta, siendo la demanda máxima 4.9 m<sup>3</sup>/min el mínimo 1.75 m<sup>3</sup>/min. El consumo mínimo se da en el rango aproximado de las 23:00 hasta las 06:00, existen puntos de consumo medio que se aproximas a 3.3 m<sup>3</sup>/min que se repiten durante la jornada de trabajo entre las 6:00 y las 23:00.

Los puntos de consumo máximo varían entre 4.3 m<sup>3</sup>/min y 4.9 m<sup>3</sup>/min y también se repiten varias veces entre las 6:00 y las 23:00.

### 4.3.2 Medición de consumo energético en primer día



Figura 4. 6 Registro del consumo energético en 1 día  
Fuente. El autor

En la figura 4.6 se aprecia variación de potencia eléctrica consumida total:

Consumo energético en carga: 567 kWh (93.1 %)

Consumo energético en vacío: 42 kWh (6.9%).

### 4.3.3 Detalle de consumos caudal y energético en 1 día

En las tablas 4.3 y 4.4 muestran todos los datos y mediciones tabulados de los tres compresores generados el día lunes 25 de julio del 2022.

Tabla 4. 3 Capacidad de generación de aire, el consumo energético y % de carga y vacío

Compressor Data (Measurement Mo. 25/07/2022)												
CH	Compressor	Output [m³/min]		[kW] Loaded		No-load	Audit Time	Time Run	Loaded		Unloaded	
		min	max	min	max	[kW]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]
1	LRS23-29D	1.0	3.5	9.40	31.20	0.00	23:58:50	100.00	23:58:50	100.00	00:00:00	0.00
2	BSR LPS-15-125		1.6	11.49	11.49	5.08	23:58:50	36.70	01:58:30	18.06	07:09:30	81.34
3	UZ0H-5P		2.0	16.65	16.65	5.23	23:58:50	4.95	00:02:40	3.75	01:08:30	96.25

Measured Data (Measurement Mo. 25/07/2022)												
CH	Compressor	Motor		Load		Total Power [kWh]			Total Air	Coste [€]		
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Unloaded	Total	m³	Loaded	Unloaded	Total	
1	LRS23-29D	1	1	547.88	0.00	547.88		3.654.0	54.79	0.00	54.79	
2	BSR LPS-15-125	35	63	18.87	36.39	55.26		158.0	1.89	3.64	5.53	
3	UZ0H-5P	7	3	0.74	9.97	6.71		5.0	0.07	0.80	0.67	

Fuente. El autor

En la tabla 4.3 se observa la capacidad de generación de aire, el consumo energético y el porcentaje de carga y vacío frente a las horas trabajadas de cada uno de los compresores. Además, se visualiza los arranque y ciclos concebidos, el consumo energético tanto en carga, vacío como el total, el

caudal generado y los gastos que involucraron en todo el día en la generación de aire comprimido.

Tabla 4. 4 Consumo energético, % de consumo energético y el consumo energético por metro cúbico

Measured Data: Mo. 25/07/2022				
Audit Time	23:58:50 [hh:mm:ss]			
Compressed Air Consumption	3,817 [m³]			
	Loaded	Unloaded	Total	
Energy Consumption	507	42	509 [kWh]	
Load / Unload Run	93.1	6.9	100.0 [%]	
Key Performance Indicator	0.1485	-	0.1595 [kWh/m³]	
	Average	Minimum	Maximum	
Compressed Air Consumption	3.0	1.8	4.9 [m³/min]	
Power Consumption	24.1	14.5	39.5 [kW]	
Net Pressure	7.7	6.7	7.9 [bar]	
System Utilization	42.1	25.4	69.0 [%]	
Compressed Air Costs				
Compressed Air Consumption Per Annum	1,394,335 [m³/a]			
	Loaded	Unloaded	Total	
Energy Costs Measuring Period	57.-	4.-	61.- [\$]	
Energy Costs Per Annum	20,822.-	1,461.-	22,283.- [\$]	
Energy Costs Per m³	0.0160 [\$/m³]			

Fuente. El autor

La tabla 4.4 cuantifica el consumo en kW, el porcentaje de dicha potencia consumida y el caudal de aire presurizado consumido por metro cúbico generado en carga, en vacío y total. También muestra el consumo de aire comprimido, la potencia requerida, la presión de la red y la eficiencia del sistema con su máximo, mínimo y promedio. Además, los datos anteriores reflejan los costos que se generarían en este día ponderados a un año, y por último, el costo de cada pie cúbico generado.

#### 4.3.4 Comparación del consumo de energía

En la figura 4.7 muestra la comparación del consumo de energía con la auditoría, realizada el 04/01/2022.





Figura 4. 6 Comparación del consumo de energía con la auditoría  
Fuente. El autor

Luego, en la tabla 4.5 muestra los datos y mediciones proyectadas para el año 2017.

Tabla 4. 5 Datos y mediciones

Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	600.564 (m³/a)		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	22,-	6,-	28,- (€)
Energy Costs Per Annum	8.032,-	2.191,-	10.223,- (€)
Energy Costs Per m³	0.0170 (€/m³)		

Fuente. El autor

❖ Año 2017

Costo de Aire comprimido en Carga = \$8032

Costo de Aire comprimido en Vacío= \$2191

Costo de Aire comprimido en Total=\$10223

Total de Aire Generado 2017 = 600 564 m³/año

Costo por m³ Generado = \$ 0.0170

❖ Año 2022

Costo de Aire comprimido en Carga = \$20822

Costo de Aire comprimido en Vacío= \$1461

Costo de Aire comprimido en Total= \$22263

Total de Aire Generado (Proyección) 2022 = 1 394 335 m<sup>3</sup>/año

Costo por m<sup>3</sup> Generado \$0.0160

#### 4.3.4 Desempeño de los compresores

A continuación, en la figura 4.8 se puede observar el comportamiento de los compresores en carga, en vacío y apagado (off).

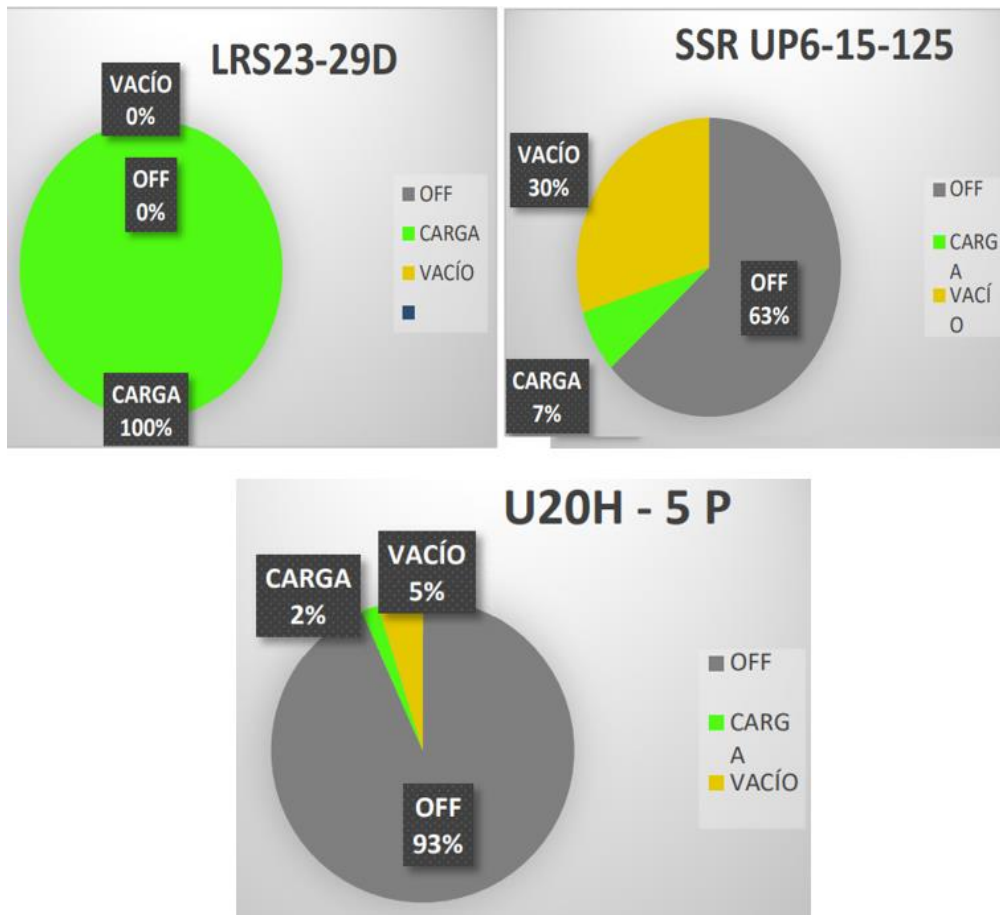


Figura 4. 7 Comportamiento de los compresores en carga, vacío, Off  
Fuente. El autor

#### 4.4 Verificación en día de menor consumo

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran los días de menor consumo de caudal, presión y comportamiento de los compresores, del día sábado 30 de julio del presente año.

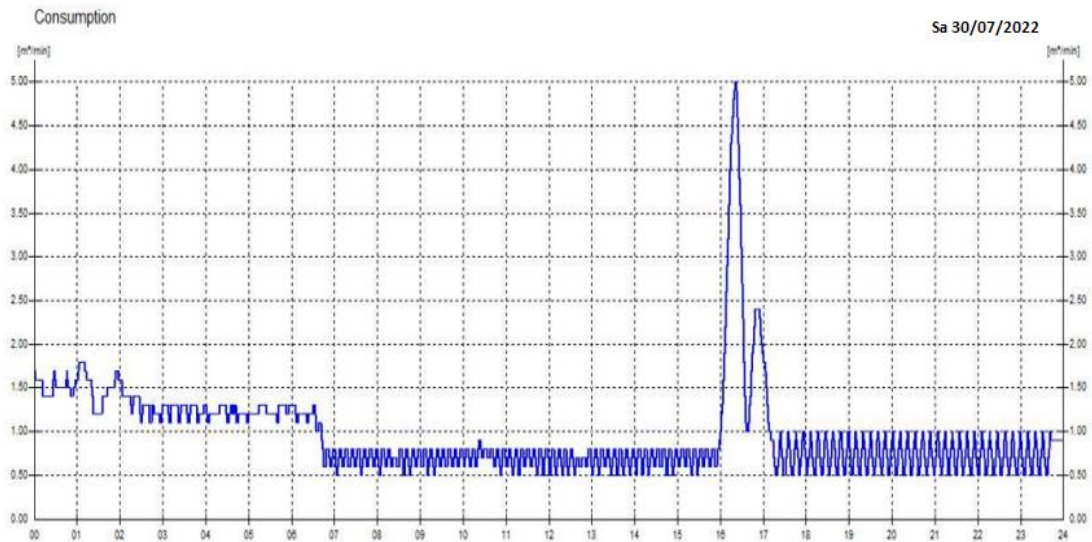


Figura 4. 8 Consumo de caudal en día de menor operación del compresor  
Fuente. El autor

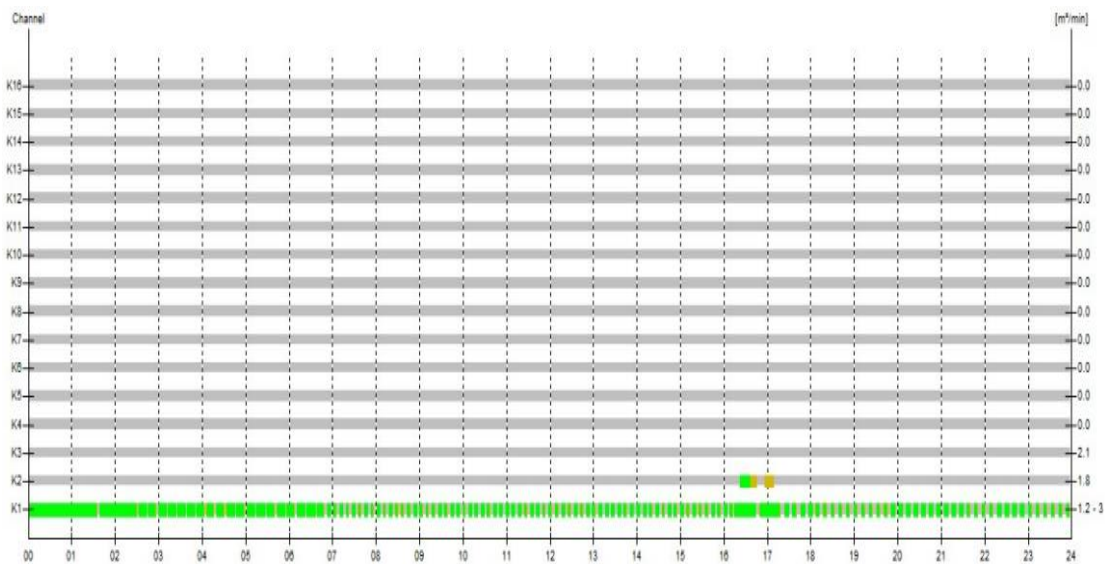


Figura 4. 9 Día de menor consumo de presión  
Fuente. El autor

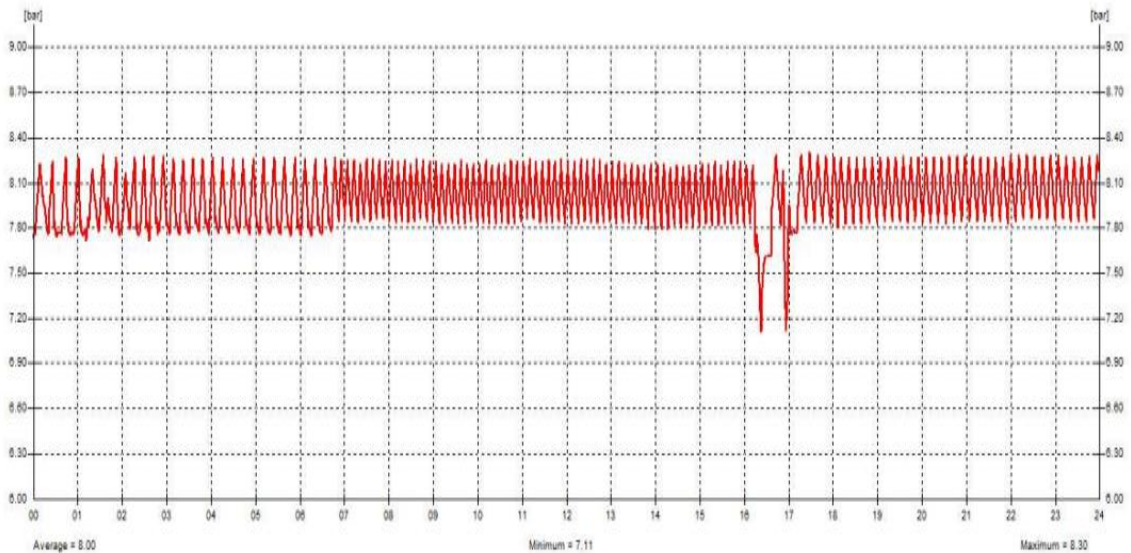


Figura 4. 10 Desempeño de los compresores en los días de menor consumo  
Fuente. El autor

#### 4.4.1 Verificación del cálculo de consumo por fugas

En la figura anterior se observa un consumo mínimo de 0.75 m<sup>3</sup>/min, el día sábado 30/07. Este consumo bajo se debe normalmente a fugas.

Se calcula el costo de generar 0-75 m<sup>3</sup>/min \*año:

$$\text{Potencia (HP)} = \text{Presión (bar)} \times \text{Caudal (m}^3/\text{min)}$$

$$\text{Potencia} = 0.75 \text{ m}^3/\text{min} * 8 \text{ bar} = 6 \text{ HP} = 4.47 \text{ KW}$$

Se calcula el costo anual:

$$\text{Costo Anual} = \text{Potencia (kW)} * (\text{costo kW/h}) * \text{tiempo (h/año)}$$

$$\text{Costo Anual} = 4.47 \text{ kW} * \$0.1 / \text{kW-h} * 8760 \text{ h/año} = \$3915.72/\text{año}$$

#### 4.4.2 Reporte de consumo por el Datalogger

A continuación, se analiza el consumo del día 30/07/2022 reportado en el Datalogger. Al final de la tabla 4.6 se observa la proyección anual de consumo, tomando en cuenta solo los días sábado \$7308.

Tabla 4. 6 Consumo por el Datalogger el 30/07/2022

Measured Data; Sa 30/07/2022			
Audit Time	23:58:20 [hh:mm:ss]		
Compressed Air Consumption	1,380 [m³]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	180	8	194 [kWh]
Load / Unload Run	95.9	4.1	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1342	-	0.1400 [kWh/m³]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	1.0	0.5	5.0 [m³/min]
Power Consumption	7.3	3.8	37.7 [kW]
Net Pressure	8.0	7.1	8.3 [bar]
System Utilisation	12.7	6.6	65.8 [%]
Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	508,478 [m³/a]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	19.-	1.-	20.- [\$]
Energy Costs Per Annum	6,943.-	385.-	7,308.- [\$]
Energy Costs Per m³	0.0144 [\$/m³]		

Los valores medidos permiten que se puedan realizar gráficas por consumo energético, por los seis días de mediciones, la herramienta o software del Datalogger facilita una correlación con valores referenciales o costos de energía consumida versus las fugas detectadas con procedimientos de caudal de aire y su relación con la operación en carga del banco de compresores.

## CONCLUSIONES

- ❖ Las curvas de consumo definen los siguientes puntos de inflexión

Potencia (Hp)= Presión (bar) x Caudal (m<sup>3</sup>/min)

1.1. 1.8 m<sup>3</sup>/min y esto implica una necesidad de 12 hp

1.2. 2,7 m<sup>3</sup>/min y esto implica una necesidad de 21.6 hp

1.3 5.1 m<sup>3</sup>/min y esto implica una necesidad de 40.8 hp

- ❖ El performance del sistema es de 68.9 % esto quiere decir que la Estación de Generación de aire no está bien utilizado, a pesar de tener una eficiencia del 93 % en carga y 7% en vacío, esto se debe a que el compresor con variador de velocidad LRS23-290 está cubriendo la parte baja del consumo de la planta que es de 1.5 m<sup>3</sup>/min de lunes a viernes, pero este compresor con esta característica será más eficiente y más rentable cubriendo la parte superior del consumo de la planta que es de 5.1 m<sup>3</sup>/min con un promedio de 2.7 m<sup>3</sup>/min donde es muy irregular y se produce el mayor consumo de planta, en las horas de 6.00 hasta las 24.00 horas.
- ❖ Las madrugadas en un horario que va de 23:00 hasta la 06:00 presentan en algunos casos un consumo constante de 2m<sup>3</sup>/min aproximadamente. En este período se recomienda que arranque el compresor de 15 HP.
- ❖ Existen días donde se detecta un consumo bajo e inusual de 0.75 m<sup>3</sup>/min. Este valor creemos que corresponde a fugas. Costo Anual=4.47 Kw\*\$0.1/Kw-h\*8760h/año = \$3915.72/año.
- ❖ Usando el calculador de tanques BOGE:  
Se concluye que un tanque de 1500 lt es el adecuado.
- ❖ El compresor que más tiempo trabaja es el LRS23-29D de Velocidad Variable y la mayor parte del tiempo dentro del rango adecuado para este tipo de compresores.
- ❖ La red de aire comprimido (Rendering), no dispone un sistema adecuado para tratamiento del aire comprimido (Filtrado y secado)

- ❖ Las conexiones de ingreso y salida de aire a los tanques de aire comprimido no son adecuadas.
- ❖ La configuración actual del sistema de generación tomando en cuenta la Potencia de los compresores, es muy adecuada a la demanda de la planta ya que se observa muy poco tiempo de consumo en vacío.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Tomando en cuenta los niveles de consumo de la planta que son comunes, se recomienda setear el controlador para que el trabajo sea de la siguiente forma:
- ❖ El orden de los compresores en cascada por presión de la estación de Generación de aire de Rendering debe ser: primero; SSR UP-15-125, segundo; LRS23-290 y tercero como auxiliar; U20H-SP, porque está configurado para la operación de lunes a viernes. Si el consumo mínimo es de 1.5 m<sup>3</sup>/min., allí puede trabajar tranquilamente el compresor de 15 hp (1.7 m<sup>3</sup>/min) desde las 0.00 hasta las 6.00 horas, casi al 100% de su capacidad. Luego el consumo medio de la planta es de 2.7 m<sup>3</sup>/min dando una diferencia de  $2.7 - 1.5 = 1.2$  m<sup>3</sup>/min, con este caudal entraría a trabajar el compresor con variador de velocidad a su 30% de su capacidad, y si el caudal máximo de consumo de la planta es de 5.1 m<sup>3</sup>/min., este compresor entraría a trabajar casi a su 100% de capacidad, pero modulando y así se ajustaría al consumo aleatorio de la planta entre las 6.00 hasta las 24.00 horas.
- ❖ Se recomienda revisar el tiempo de vacío de estos dos compresores SSR UP15-125 y U20H-SP, ya que en el análisis se visualiza que pasan mucho tiempo en vacío (de 2 a 7 min) antes de apagarse.
- ❖ Debido a la gran demanda instantánea de consumo de aire de la planta, se percibe que la presión tiene mucha fluctuación entre los valores de 6.7 a 7.9 bares; esto genera que los dos compresores fijos arranque al mismo tiempo y para cubrir esta demanda instantánea, se sugiere el orden de cascada de los compresores (como está mencionado en la



primera recomendación), para aliviar el consumo energético de la estación, ya que la velocidad de reacción del compresor con variador de velocidad es más eficiente. Asimismo, mantendrá más estable la presión y se evitaría en lo posible que el tercer compresor arranque.

- ❖ La optimización se da por la reducción de fugas esto implica un ahorro energético de por lo menos 2000 USD/año.
- ❖ Dependiendo de la aplicación del aire comprimido, se recomienda la instalación de un secador frigorífico de 175 CFM, así como un sistema de filtrado para mejorar la calidad del aire suministrado.
- ❖ Además, recomienda rediseñar las conexiones de los tanques de aire comprimido que se encuentran al final de la línea (RENDERING), tomando en cuenta que el ingreso del aire debe ser por la parte inferior del tanque y la salida por la parte superior; así como la instalación de purgas automáticas para el drenaje de condensado acumulado en los tanques.

## Referencias

- Arsercobe. (2019). *Cómo funciona un compresor de pistón*. Retrieved from <https://www.arsercobe.com/post/c%C3%B3mo-funciona-un-compresor-de-pist%C3%B3n>
- Atlas Copco. (2016). *¿Qué es un depósito de aire?* Retrieved from <https://www.atlascopco.com/es-ec/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-an-air-receiver>
- BOGE. (2019). *AIReport*. Retrieved from <http://www.energianeumatica.com/air-report.html>
- Copper Development Association Inc. (2019). *Calidad energética*. Retrieved from <https://www.copper.org/applications/electrical/pq/primer.html>
- Cristian Toledo. (2021). *Eficiencia Energética de Sistemas Neumáticos en Industria Alimenticia*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/17179/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-268.pdf>
- Educarex. (2016). *Guía de prevención de riesgos por el uso del aire comprimido y máquinas portátiles neumáticas*. Retrieved from [https://www.educarex.es/pub/cont/com/0055/documentos/10\\_Informaci%C3%B3n/03\\_Guias/guia\\_Aire\\_Comprimido.pdf](https://www.educarex.es/pub/cont/com/0055/documentos/10_Informaci%C3%B3n/03_Guias/guia_Aire_Comprimido.pdf)
- Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. (2014). (D11624593).
- Fernandez, P. (SF). *Compresores alternativos*. Retrieved from <https://secure.urd.com/view/externalDocument/479110306-NmJiYjVIMTUtODMwMC00ZWM3LTgxYTktODVkZTQzYzM3NTFj-2/download>
- García, L. (2020). *Evaluación de los sistemas de aire comprimido en el procesamiento industrial de cárnicos para mejorar el modelo de la eficiencia energética*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15513/1/T-UCSG-PRE-TEC-IECA-124.pdf>
- Industria GSL. (2021). *COMPRESOR*. Retrieved from <https://industriassgsl.com/blogs/automatizacion/compresor>

- Instrumentación Industrial . (2008). *Compresores Neumáticos*. Retrieved from  
Elementos finales de control:  
<http://instrumentacionindustrial2007ii.blogspot.com/2008/03/compresores-neumticos.html>
- Kaeser. (2018). *Tuberías de aire comprimido- Kaeser Compresores*. Retrieved from <https://co.kaeser.com/productos-y-soluciones/>
- Mundo Compresor. (2019). Retrieved from [https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores#compresor\\_de\\_lobulos](https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores#compresor_de_lobulos)
- Narvaez, F. (2018). *Eficiencia Energética en sistemas de aire comprimido*. Retrieved from <https://www.colombiaproductiva.com/getattachment/1da39f8c-764c-48c6-957a-9c2f14b81e28/Memorias-sistema-de-aire-comprimido.aspx>
- Piccardo, N. (2017). *Optimice un sistema de aire comprimido con una demanda de aire muy fluctuante*. Retrieved from <https://www.airbestpractices.com/system-assessments/end-uses/optimize-compressed-air-system-highly-fluctuating-air-demand>
- Portal Electromecánico. (2017). *Compresor de paletas*. Retrieved from [http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Compresores/compresor\\_de\\_paletas.html](http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Compresores/compresor_de_paletas.html)
- Portal Electromecánico. (2019). *Compresor Centrifugo*. Retrieved from [http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Compresores/compresor\\_centrifugo.html](http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/Compresores/compresor_centrifugo.html)
- Posada, C., & Villegas, C. (2017). *Propuesta de diseño y construcción de un equipo para diagnóstico de fallas en compresores herméticos*. Retrieved from <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13023/1/Propuesta%20de%20dise%c3%b1o%20y%20construcci%c3%b3n%20de%20un%20equipo%20para%20diagnc%3%b3stico%20de%20fallas%20en%20compresores%20herm%c3%a9ticos.pdf>

TEC. (2020). *Tipos de compresores de aire*. Retrieved from <https://tecencompresion.com/tipos-de-compresores-de-aire/>

Torres, J. (2022). *Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/18036/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-300.pdf>

Universidad Técnica del Norte. (2014). (D10633655).

VP INSTRUMENT. (2017). *Principios de medición de los KPI del sistema de aire comprimido*. Retrieved from <https://www.vpinstruments.com/es/measurement-principles-for-compressed-air-system-kpis/>

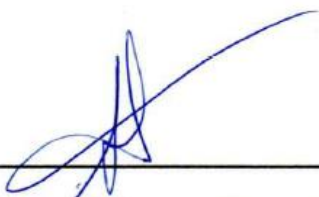
## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Paladines Lizondo, Jorge David** con C.C: **0924915721** autor del Trabajo de Titulación **Análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras. Propuesta de plan de mejoras**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Eléctrico Mecánica** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 16 de Septiembre de 2022



---

**Paladines Lizondo, Jorge David**

C.C: 0924915721

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis de fugas en generación y distribución de aire comprimido en proceso industrial. Propuesta de plan de mejoras.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Paladines Lizondo, Jorge David		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Suárez Murillo, Efraín Oswaldo. MSC.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Eléctrico Mecánica		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Eléctrico Mecánico		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	16 de septiembre del 2022	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	60
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Eficiencia Energética, Máquinas eléctricas, Mediciones eléctricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Fugas, Eficiencia energética, Compresor, Red de distribución, Auditoria.		
<p>El presente trabajo académico enfoca el análisis de energía desperdiciada en un sistema de aire comprimido industrial, las fugas de aire comprimido vienen a ser energía desperdiciada. El objetivo principal es determinar fugas y averías del aire presurizado en las instalaciones de la planta, desde su etapa de generación hasta la red de distribución. La aportación de este análisis plantea un plan de mejoras para reducción de costos por fugas no planificadas en la instalación de aire presurizado. Las fugas no planificadas son problemas de mantenimiento en curso y pueden aparecer en cualquier parte del sistema. Estas fugas requieren un programa continuo de detección y reparación de fugas de aire. La metodología a emplear es descriptiva para fundamentar la técnica del aire comprimido y de vacío. Se emplea el método analítico sintético para realizar el levantamiento de equipos de generación y almacenamiento de aire presurizado y de vacío. estos datos de mediciones con equipo especializado permitirán comparar el estado energético actual y mostrar potenciales para mejoras. en el sistema de aire comprimido.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 0986556448	<b>E-mail:</b> Jorge.paladines@cu.ucsg.edu.ec	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:</b>	<b>Nombre:</b> Ing. Efraín Vélez Tacuri		
<b>COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Teléfono:</b> +593 99 408 4215		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:efrain.velez@cu.ucsg.edu.ec">efrain.velez@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			