



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el  
sistema de aire comprimido de una instalación industrial**

AUTOR:

Torres Silva, José Omar

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

TUTOR:

ING. Philco Asqui, Luis Orlando

Guayaquil, Ecuador

9 de marzo del 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, como requerimiento para la obtención de Título de **Ingeniería en Eléctrico Mecánica**

TUTOR

---

M. Sc. Philco Asqui, Luis Orlando

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo 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, **Torres Silva, José Omar**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial**, 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 9 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

Torres Silva, José Omar



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Torres Silva, José Omar**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación, **Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

Torres Silva, José Omar

# REPORTE URKUND

**URKUND** Orlando Philco Asqui (orlando.philco)

	Lista de fuentes	Bloques
<b>Documento</b> TORRES JOSE.pdf (D127419485)	<a href="https://www.servaire.com/recambio-del-airend-en-un-compre...">https://www.servaire.com/recambio-del-airend-en-un-compre...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Presentado</b> 2022-02-08 20:16 (-05:00)	<a href="http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0765_FA.pdf">http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0765_FA.pdf</a>	<input type="checkbox"/>
<b>Presentado por</b> orlandophilco_7@hotmail.com	borrador Jacho Loachamín Edison.docx	<input type="checkbox"/>
<b>Recibido</b> orlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com	Trabajo_Suficiencia_Ortiz_De_Orue_F.docx	<input type="checkbox"/>
<b>Mensaje</b> TESIS JOSE TORRES <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a>	<a href="https://www.mundohvacr.com.mx/2008/04/el-compresor-scol...">https://www.mundohvacr.com.mx/2008/04/el-compresor-scol...</a>	<input type="checkbox"/>
1% de estas 37 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.		<input type="checkbox"/>

0 Advertencias. Reiniciar. Compartir

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA TEMA: EVALUACION DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA BAJO LA NORMA ISO 11011 EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE UNA INSTALACION INDUSTRIAL AUTOR: TORRES SILVA, JOSE OMAR

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO- MECÁNICA TUTOR: ING. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI MGS. GUAYAQUIL, ECUADOR

II 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, como requerimiento para la obtención de Título de Ingeniería en Eléctrico Mecánica TUTOR \_\_\_\_\_ ING. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI. MGS DIRECTOR DE CARRERA

## **AGRADECIMIENTO**

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 por brindarme la oportunidad de formar parte de la comunidad estudiantil.

A mi Padre y Madre que con esfuerzo me han dado su apoyo, cariño y ejemplo para superarme, a mi familia que me ha apoyado en este reto el cual lo hemos ganado juntos.

A mi tutor Ing. Orlando Philco A. que impartió su experiencia y conocimiento para la aportación de este trabajo de titulación.

El Autor

## **DEDICATORIA**

A mis padres que con su ferviente amor han sabido guiarme y 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.

También dedico a mis hijos que han sido mi mayor motivación para nunca rendirme ante los estudios y poder llegar y ser un ejemplo para ellos.

El autor



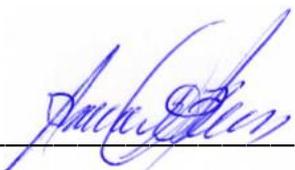
**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. 

**M. Sc. Romero Paz, Manuel De Jesus**  
DECANO

f. 

**M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando**  
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

**M. Sc. Quezada Calle, Edgar Raúl**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

REPORTE URKUND .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
INDICE DE TABLAS .....	XIV
RESUMEN .....	XVI
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	2
1.1 Introducción .....	2
1.2 Justificación .....	3
1.3 Planteamiento del problema .....	3
1.4. Objetivo General .....	4
1.5 Objetivos Específicos .....	4
1.6 Metodología .....	4
CAPÍTULO 2: INSTALACIONES NEUMÁTICAS .....	5
2.1 Fundamentos de neumática y sistemas neumáticos .....	5
2.2 Elementos del sistema neumático .....	6
2.2.1 Suministro de aire .....	7
2.2.2 Equipos de tratamiento del aire comprimido .....	7
2.2.3 Tubos, mangueras y accesorios .....	8
2.2.4 Válvulas de control .....	8
2.2.5 Controles de Flujo y Silenciadores .....	8
2.2.6 Cilindros, mesas deslizantes, actuadores rotativos y pinzas .....	8
2.3 Ventajas de los sistemas neumáticos .....	9
2.4 Aplicación de sistemas neumáticos .....	10

2.5 Generación de aire presurizado .....	11
2.5.1 Compresores alternativos.....	12
2.5.2 Compresores rotativos .....	14
2.5.3 Compresores Dinámicos .....	16
2.6 Rendimiento del Compresor .....	17
2.6.1 Capacidad de un compresor .....	17
2.7 Operación eficiente de los sistemas de aire comprimido .....	19
2.8 Sopladores en lugar del sistema de aire comprimido .....	25
2.9 Verificación para la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido .....	34
2.10 Norma ISO 11011 .....	37
2.10.1 Beneficios de la norma ISO 11011 .....	37
2.11 La eficiencia energética según FESTO.....	38
2.11.1 PreAuditoria de Festo .....	39
2.11.2 Módulos de servicio.....	40
2.11.2.1 Análisis energético de la generación de aire comprimido	40
2.11.2.2 Análisis de la calidad del aire comprimido .....	41
2.11.2.3 Medición de caída de presión .....	41
2.11.2.4 Análisis de consumo de aire comprimido .....	42
2.11.2.5 Detección y eliminación de fugas .....	43
2.11.2.6 Análisis de máquinas para la eficiencia energética .....	43
2.11.2.7 Mantenimiento .....	44
CAPÍTULO 3: AUDITORÍA ENERGÉTICA A COMPRESORES .....	45
3.1 Datos técnicos de los compresores .....	45
3.2 Metodología de medición.....	47
3.2.1 Registro de datos utilizando un equipo PDA.....	47

3.2.2 Procedimiento para el registro de datos a través del PDA .....	47
3.2.3 Procedimiento para realizar la medición del compresor .....	48
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE DATOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ...	51
4.1 Día de menor consumo .....	51
4.2 Análisis de la potencia de compresores .....	53
4.2.1 Días de mayor consumo .....	56
4.2.2 Segundo día con alto consumo .....	62
4.2.3 Tercer día con alto consumo .....	66
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES.....	72
ANEXO:.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2:

Figura 2. 1 Dispositivos de un sistema neumático .....	5
Figura 2. 2 Componentes principales de un sistema neumático industrial .....	6
Figura 2. 3 Filtro de aire FESTO .....	7
Figura 2. 4 Actuadores neumáticos .....	9
Figura 2. 5 Tipos de compresores .....	12
Figura 2. 6 Esquema de funcionamiento de un compresor alternativo .....	13
Figura 2. 7 Compresor rotativo .....	14
Figura 2. 8 Compresor de aire de tornillo .....	15
Figura 2. 9 Compresores dinámicos centrífugo y axial .....	17
Figura 2. 10 Ahorro al usar aire comprimido .....	39
Figura 2. 11 Eficiencia Energética .....	39
Figura 2. 12 Análisis energético de la generación de aire comprimido .....	40
Figura 2. 13 Análisis de la calidad del aire comprimido .....	41
Figura 2. 14 Medición de caída de presión .....	42
Figura 2. 15 Análisis de consumo de aire comprimido .....	42
Figura 2. 16 Detección y eliminación de fugas .....	43
Figura 2. 17 Análisis con experto de máquinas para la eficiencia energética .....	44

### CAPÍTULO 3:

Figura 3. 1 Caja de medición Data Logger BOGE .....	48
Figura 3. 2 Procedimiento para realizar la medición de un compresor .....	48
Figura 3. 3 Diagrama de presión .....	50

## **CAPÍTULO 4:**

Figura 4. 1 Diagrama de caudal dado por compresor 1 vs. tiempo .....	51
Figura 4. 2 Variación de presión en la red .....	52
Figura 4. 3 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50 Hp .....	53
Figura 4. 4 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30 Hp .....	54
Figura 4. 5 Consumo energético en carga-descarga vs. tiempo. ....	55
Figura 4. 6 Mayor consumo de aire en la planta .....	56
Figura 4. 7 Diagrama de presión en la red en una hora .....	56
Figura 4. 8 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP .....	58
Figura 4. 9 Trabajo de compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP .....	58
Figura 4. 10 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP .....	59
Figura 4. 11 Consumo Energético en Carga-Descarga Vs. Tiempo.....	59
Figura 4. 12 Diagrama de Caudal Vs. Tiempo .....	60
Figura 4. 13 Diagrama de presión en la red .....	61
Figura 4. 14 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP .....	62
Figura 4. 15 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP .....	63
Figura 4. 16 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP .....	63
Figura 4. 17 Consumo energético en carga-descarga vs. tiempo.....	64
Figura 4. 18 Diagrama de caudal vs. tiempo .....	65
Figura 4. 19 Presión en la red .....	65
Figura 4. 20 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP .....	67
Figura 4. 21 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP .....	67
Figura 4. 22 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP .....	68
Figura 4. 23 Consumo Energético en Carga-Descarga Vs. Tiempo.....	68

## INDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2:

Tabla 2. 1 Criterios generales de selección de compresores .....	17
Tabla 2. 2 Efecto de la temperatura del aire de admisión en el consumo de energía .....	19
Tabla 2. 3 Efecto de la caída de presión a través del filtro de entrada de aire sobre el consumo de energía .....	20
Tabla 2. 4 Humedad en el aire ambiente en varios niveles de humedad .....	20
Tabla 2. 5 Efecto de la altitud en la eficiencia volumétrica .....	21
Tabla 2. 6 Enfriamiento entre etapas de un compresor alternativo .....	22
Tabla 2. 7 Requisitos típicos de agua de enfriamiento .....	23
Tabla 2. 8 Ahorro de energía típico a través de la reducción de presión.....	23
Tabla 2. 9 Consumo de energía específico típico de los compresores alternativos .....	25
Tabla 2. 10 Consumo de un compresor alternativo típico con varias cargas	26
Tabla 2. 11 Compresión de gas con carga parcial típica:.....	26
Tabla 2. 12 Requisitos de energía típicos para herramientas neumáticas y eléctricas .....	27
Tabla 2. 13 Descarga de aire (m <sup>3</sup> /minuto) por orificio (constante orificio cd – 1.0).....	29
Tabla 2. 14 Contenido de humedad en el aire.....	32
Tabla 2. 15 Punto de rocío a presión típico y datos de consumo de energía para secadoras .....	32

### CAPÍTULO 3:

Tabla 3. 1 Datos de placa del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP .....	45
Tabla 3. 2 Datos de placa del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP .....	45

Tabla 3. 3 Datos de placa del compresor N° 3 Atlas Copco 50HP .....	46
Tabla 3. 4 Datos de placa del compresor N° 4 Ingersoll Rand 30HP .....	46
Tabla 3. 5 Datos de placa del Secador N° 5 Ingersoll Rand .....	46
Tabla 3. 6 Datos del Tanque Pulmón.....	46
Tabla 3. 7 Datos Adicionales .....	47

#### **CAPÍTULO 4:**

Tabla 4. 1 Comportamiento de los compresores .....	52
Tabla 4. 2 Resumen del comportamiento de los compresores .....	55
Tabla 4. 3 Comportamiento de los compresores .....	57
Tabla 4. 4 Resumen del comportamiento de los compresores.....	60
Tabla 4. 5 Comportamiento de los compresores .....	61
Tabla 4. 6 Resumen del comportamiento de los compresores .....	64
Tabla 4. 7 Comportamiento de los compresores .....	66
Tabla 4. 8 Resumen del comportamiento de los compresores .....	69

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal cumplir con el estudio de eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial. El cumplimiento de la norma ISO11011 considera los sistemas de aire comprimido en tres etapas: suministro, distribución y demanda de aire comprimido. La metodología utilizada fue; descriptiva para fundamentar la generación y distribución del aire comprimido. Se empleó el método analítico sintético para realizar el levantamiento de equipos de generación y almacenamiento de aire presurizado, Se aplicó el método empírico por el uso de equipamiento y software especializado en obtención de datos o mediciones de consumo energético. Se evalúan fugas y averías del aire presurizado en las instalaciones de la planta. La contribución de este trabajo de titulación, propone realizar nuevas configuraciones en la red de distribución que mejoren la eficiencia energética, o bien, realizar modificaciones en el modo de funcionamiento o programación de los equipos existentes en la planta.

**PALABRAS CLAVES:** Aire presurizado, ISO 11011, auditoria energética, compresores, red de distribución.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to comply with the energy efficiency study under ISO 11011 in the compressed air system of an industrial installation. Compliance with the ISO11011 standard considers compressed air systems in three stages: compressed air supply, distribution and demand. The methodology used was; descriptive to support the generation and distribution of compressed air. The synthetic analytical method was used to perform the survey of pressurized air generation and storage equipment. The empirical method was applied by the use of specialized equipment and software to obtain data or measurements of energy consumption. Leaks and breakdowns of pressurized air in the plant facilities are evaluated. The contribution of this titling work proposes to make new configurations in the distribution network that improve energy efficiency, or to make modifications in the mode of operation or programming of the existing equipment in the plant.

**KEY WORDS:** Pressurized air, ISO 11011, energy audit, compressors, distribution network

# **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **1.1 Introducción**

En muchas instalaciones industriales, se emplea tecnologías neumático. En dichas tecnologías los compresores de aire generan o producen aire presurizado que previamente es dimensionado a partir de la demanda del aire presurizado. Existe demanda por consumo de herramienta y máquinas neumáticas.

Las ineficiencias en los sistemas de aire comprimido pueden ser significativas. Los ahorros de energía derivados de las mejoras del sistema pueden ser sustanciales, lo que puede generar ahorros anuales potenciales, según el uso. Un sistema de aire comprimido administrado adecuadamente puede ahorrar energía, reducir el mantenimiento, disminuir el tiempo de inactividad, aumentar el rendimiento de producción y mejorar la calidad del producto.

Los sistemas de aire comprimido pueden observarse de un lado de suministro (generación) y un lado de demanda (distribución y consumo). El lado de suministro incluye compresores y equipamiento de tratamiento de aire (secadores, separadores de agua y filtros). El lado de la demanda incluye equipos de distribución y uso final por parte de herramientas y máquinas neumáticas. Un lado de suministro correctamente administrado dará como resultado un suministro de aire estable, seco y limpio a la presión adecuada de manera confiable y rentable. Un lado de la demanda correctamente gestionado minimiza el aire desperdiciado y utiliza aire comprimido para las aplicaciones adecuadas. Mejorar y mantener el rendimiento máximo del sistema de aire comprimido requiere abordar tanto el lado de la oferta como el de la demanda del sistema y cómo interactúan los dos.

Un sistema de aire comprimido industrial moderno se compone de varios subsistemas principales. Los principales subsistemas incluyen el compresor, el motor primario, los controles, el equipo de tratamiento y los accesorios, y el sistema de distribución. El compresor es el dispositivo mecánico que toma aire ambiente y aumenta su presión. El motor primario alimenta el compresor.

Los controles sirven para regular la cantidad de aire comprimido que se produce. El equipo de tratamiento elimina los contaminantes del aire comprimido y los accesorios mantienen el sistema funcionando correctamente. Los sistemas de distribución son análogos al cableado en el mundo eléctrico: transportan aire comprimido a donde se necesita. El almacenamiento de aire comprimido también puede servir para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema

## **1.2 Justificación**

La valoración de fugas o pérdidas de presión en la red de distribución de aire comprimido de una empresa embotelladora de gaseosas, así como métodos para reducir fugas y mantener un caudal de trabajo óptimo permitirá ahorro energético en el sistema de aire comprimido. Posteriormente se reducen costos gracias a que la disponibilidad de las máquinas en el proceso siempre estará en aumento. 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 una 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. (Worthington Internacional Compresores, 2007).

La ISO 11011 instituye los requisitos para examinar los datos de la evaluación, la documentación de los descubrimientos de la evaluación, más la identificación de una proyección de ahorros de energía resultante, en este caso del aire comprimido o presurizado. Finalmente identifica los roles y responsabilidades de aquellos involucrados en la actividad de evaluación.

## **1.3 Planteamiento del problema**

En la actualidad la industria de bebidas carbonatadas, son automatizadas y utilizan entre otros: sistemas electroneumáticos en la producción y embotellado de productos como bebidas gaseosas envasados en diferentes envases. En la producción el sistema de aire comprimido por la misma operación continua se pierde parte del aire comprimido, Pero también aparecen fugas no detectadas e indeseadas que generarán costos o pago de

facturas eléctricas elevadas. No existe una evaluación de fugas o caídas de presión en el sistema de generación y distribución de la planta.

#### **1.4. Objetivo General**

Efectuar el análisis de eficiencia energética de la generación y distribución de aire comprimido en una industria de bebidas carbonatadas.

#### **1.5 Objetivos Específicos**

1. Describir la operación de una instalación de aire comprimido en una planta industrial.
2. Conocer el estándar ISO 11011 para la generación, distribución y consumo de aire comprimido eficiente.
3. Registrar datos de generación y distribución de aire comprimido en la planta.
4. Evaluar y plantear mejoras para la eficiencia energética en la planta.

#### **1.6 Metodología**

El tipo de investigación utilizado en este trabajo es; descriptiva por cuanto se busca especificar las características de la tecnología neumática. El método analítico sintético para cumplir con el levantamiento de equipos de generación y almacenamiento de aire presurizado, Se aplicó el método empírico por el uso de equipamiento y software especializado en obtención de datos o mediciones de consumo energético. Se evalúan fugas y averías del aire presurizado en las instalaciones de la planta. Finalmente, el método comparativo en base a la norma ISO 11011 que determina requisitos de una auditoria energética de evaluación del sistema de aire comprimido en la planta.

## CAPÍTULO 2: INSTALACIONES NEUMÁTICAS

### 2.1 Fundamentos de neumática y sistemas neumáticos

Los sistemas neumáticos se crean fácilmente a partir de componentes estándar para brindar un suministro confiable de aire comprimido y producir un movimiento económico en maquinaria, equipos y actuadores.

Los sistemas neumáticos se usan comúnmente para crear movimiento lineal y rotacional en muchos tipos de aplicaciones de maquinaria y equipo. Estos sistemas se ensamblan a partir de una variedad de componentes estándar y utilizan aire comprimido para lograr un movimiento controlado.

Los sistemas neumáticos mantienen una merecida reputación por ofrecer una excelente combinación de tamaño compacto, buena disponibilidad de energía y operación confiable. Estos sistemas pueden ser relativamente simples y rentables de diseñar, instalar y mantener en comparación con otras opciones (Copper Development Association Inc., 2019).

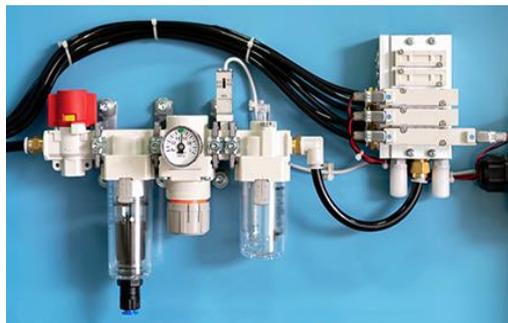


Figura 2. 1 Dispositivos de un sistema neumático  
Fuente. (Allied Electronics & Automation, 2019)

La neumática ha desempeñado desde hace mucho tiempo un papel importante como tecnología en la realización del trabajo mecánico. También se está utilizando en el desarrollo de soluciones de automatización. Los sistemas neumáticos son similares a los sistemas hidráulicos, pero en estos sistemas se usa aire comprimido en lugar de fluido hidráulico.

Un sistema neumático es un sistema que utiliza aire comprimido para transmitir y controlar la energía. Además, se utilizan ampliamente en diversas industrias. La mayoría de los sistemas neumáticos dependen de un suministro constante de aire comprimido para que funcionen. Esto es proporcionado por un compresor de aire. El compresor aspira aire de la atmósfera y lo almacena

en un tanque de alta presión llamado receptor. Luego, este aire comprimido se suministra al sistema a través de una serie de tuberías y válvulas.

Por consiguiente, la neumática tiene que ver con el uso de aire comprimido para hacer el trabajo. El aire comprimido es el aire de la atmósfera que se reduce en volumen por compresión aumentando así su presión. Se utiliza como medio de trabajo normalmente a una presión de 6 kg/mm<sup>2</sup> a 8 kg/mm<sup>2</sup>. Para el uso de sistemas neumáticos, se puede desarrollar una fuerza máxima de hasta 50 kN. El accionamiento de los controles puede ser manual, neumático o eléctrico. El aire comprimido se utiliza principalmente para realizar trabajo actuando sobre un pistón o paleta. (Mundo Compresor, 2021)

Los sistemas neumáticos mantienen su reputación por ofrecer una excelente combinación de tamaño compacto, buena disponibilidad de energía y operación confiable. Estos sistemas son relativamente simples y rentables de diseñar, instalar y mantener en comparación con otras opciones.

## 2.2 Elementos del sistema neumático

Los principales elementos del sistema neumático muestra en la figura 2.2,

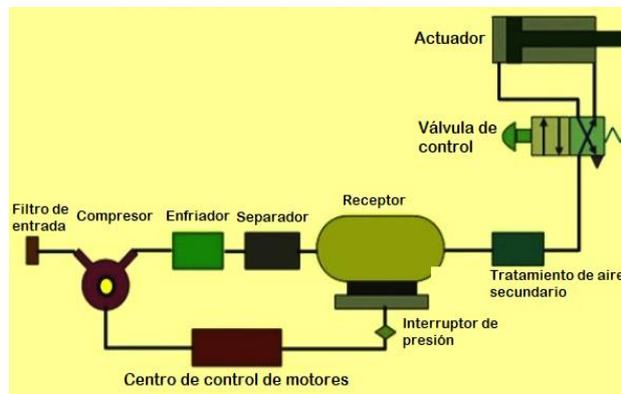


Figura 2. 2 Componentes principales de un sistema neumático industrial  
Fuente. (Compressed Air Challenge (CAC), 2006)

La máquina de generación del aire comprimido es el compresor, este puede ser dimensionado de acuerdo con la demanda del consumo. Después de la generación del aire presurizado, este debe ser tratado para eliminar impurezas, agua y aceite. Luego en su distribución deberá asegurar suficiente caudal y presión para que funcionen correctamente las máquinas y herramientas neumáticas (Ortega, 2015).

### 2.2.1 Suministro de aire

Generalmente compresores, que deben dimensionarse para suministrar un volumen de pies cúbicos por minuto (*CFM, Cubic Feet per Minute*), suficiente para todos los puntos de uso. A menudo, hay varios compresores en paralelo para la redundancia, y pueden usar esquemas de arranque alternativos para equilibrar la carga. (Jufend Power, 2021). El aire comprimido también se puede conectar a tanques de almacenamiento para que los compresores se enciendan y apaguen con menos frecuencia. Los sistemas de control neumático suelen utilizar presiones operativas entre 20 y 130 libras por pulgada cuadrada (psi).

### 2.2.2 Equipos de tratamiento del aire comprimido

Estos equipos o dispositivos se ubican principalmente “aguas arriba” y también aguas abajo en los puntos de uso, y se denominan colectivamente “dispositivos de preparación o tratamiento de aire”. Todos los dispositivos de preparación de aire sirven para proteger los componentes sensibles aguas abajo. Entre estos equipos se encuentran los filtros de aire (véase la figura 2.3), secadores, lubricadores y reguladores de presión.



Figura 2. 3 Filtro de aire FESTO  
Fuente. (Leal, 2021)

Existe una variedad de filtros para eliminar el polvo, la suciedad, la humedad y el aceite del compresor. Los secadores se utilizan cuando es necesario para reducir el punto de rocío. Los reguladores de presión mantienen una presión constante aguas abajo para que el equipo pueda funcionar de manera confiable independientemente de la presión aguas arriba. Algunos equipos aguas abajo, como las herramientas giratorias de alta velocidad, requieren

una pequeña cantidad de aceite en el aire que pueden proporcionar los lubricadores (Ingersoll Rand, 2021).

### **2.2.3 Tubos, mangueras y accesorios**

La presión de aire comprimido principal, generalmente se enruta a través de tuberías. La tubería de metal se puede usar en puntos de bajada fuera de la línea principal cuando se necesita resistencia y rigidez, pero si las clasificaciones de presión lo permiten, entonces se pueden tender tuberías y mangueras flexibles hasta los puntos de uso. Estas últimas se pueden seleccionar para conectar/desconectar rápidamente múltiples puntos de tubería a la vez para facilitar el mantenimiento, mientras que los colectores son una forma conveniente de distribuir muchas conexiones de tubería. Los accesorios pueden ser roscados clásicos o el mucho más popular estilo de conexión a presión de un toque.

### **2.2.4 Válvulas de control**

Hay varios tipos de válvulas de control neumático, incluidos los manuales/mecánicos, los solenoides eléctricos individuales y los colectores múltiples. Los tipos manuales son utilizados por el personal de servicio, mientras que los tipos mecánicos se utilizan para detectar posiciones para la lógica neumática en una máquina. Las electroválvulas eléctricas, ya sean individuales o agrupadas en colectores, son las más adecuadas para el control automático ( Compressed Air & Gas Institute (CAGI), 2021).

### **2.2.5 Controles de Flujo y Silenciadores**

Los controles de caudal y silenciadores son accesorios para optimizar y mejorar el funcionamiento de los equipos. Los controles de flujo permiten controlar individualmente la velocidad del movimiento en cada dirección. Los silenciadores reducen el sonido del escape de aire para proporcionar un entorno operativo más silencioso.

### **2.2.6 Cilindros, mesas deslizantes, actuadores rotativos y pinzas**

Todos los actuadores neumáticos convierten la presión del aire en movimiento físico. Los más populares son los cilindros, las mesas deslizantes, los

actuadores giratorios y las abrazaderas/pinzas para aplicaciones de movimiento y los actuadores de cuarto de vuelta para controlar las válvulas de proceso. Estos dispositivos vienen en muchos tamaños y formas y deben coordinarse cuidadosamente con el diseño mecánico. Además, estos dispositivos, y la frecuencia con la que funcionan, determinan el suministro de aire comprimido necesario.

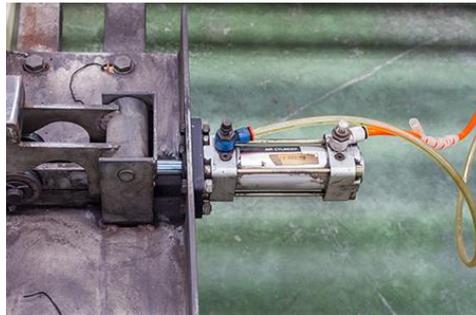


Figura 2. 4 Actuadores neumáticos  
Fuente. (Ghiglia, 2021)

### 2.3 Ventajas de los sistemas neumáticos

Los sistemas neumáticos son ampliamente utilizados en diferentes industrias para el accionamiento de máquinas automáticas. Por tanto, los sistemas neumáticos tienen muchas ventajas, tales como:

- ❖ **Alta efectividad:** hay un suministro ilimitado de aire en la atmósfera para producir aire comprimido. También existe la posibilidad de un fácil almacenamiento en grandes volúmenes. El uso de aire comprimido no está restringido por la distancia, ya que puede transportarse fácilmente a través de tuberías. Después de su uso, el aire comprimido puede liberarse directamente a la atmósfera sin necesidad de procesamiento.
- ❖ **Alta durabilidad y confiabilidad:** los componentes del sistema neumático son extremadamente duraderos y no se dañan fácilmente. En comparación con los componentes electromotores, los componentes neumáticos son más duraderos y fiables.
- ❖ **Diseño simple:** los diseños de los componentes del sistema neumático son relativamente simples. Por lo tanto, son más adecuados para su uso en sistemas de control automático simples. Hay elección de movimiento, como movimiento lineal o movimiento de rotación angular con velocidades operativas simples y continuamente variables.

- ❖ **Alta adaptabilidad a entornos hostiles:** en comparación con los elementos de otros sistemas, el aire comprimido se ve menos afectado por las altas temperaturas, el polvo y el entorno corrosivo, entre otros. Por lo tanto, es más adecuado para entornos hostiles.
- ❖ **Aspectos de seguridad:** los sistemas neumáticos son más seguros que los sistemas electromotores porque pueden funcionar en un entorno inflamable sin provocar incendios o explosiones. Aparte de eso, la sobrecarga en el sistema neumático solo conduce al deslizamiento o al cese de la operación. A diferencia de los componentes del sistema electromotor, los componentes del sistema neumático no se queman ni se sobrecalientan cuando se sobrecargan.
- ❖ **Fácil selección de velocidad y presión:** las velocidades de movimiento rectilíneo y oscilante de los sistemas neumáticos son fáciles de ajustar y están sujetas a pocas limitaciones. La presión y el volumen del aire comprimido se pueden ajustar fácilmente mediante un regulador de presión.
- ❖ **Respetuoso con el medio ambiente:** la operación de los sistemas neumáticos no produce contaminantes. Los sistemas neumáticos son ambientalmente limpios y con el tratamiento adecuado del aire de escape se pueden instalar según los estándares de las salas limpias. Por lo tanto, los sistemas neumáticos pueden funcionar en entornos que exigen un alto nivel de limpieza. Un ejemplo son las líneas de producción de circuitos integrados.
- ❖ **Económico:** como los componentes del sistema neumático no son caros, los costos de los sistemas neumáticos son bastante bajos. Además, como los sistemas neumáticos son muy duraderos, el costo de mantenimiento es significativamente menor que el de otros sistemas (Fernández, 2015).

## **2.4 Aplicación de sistemas neumáticos**

Hay varias aplicaciones para los sistemas neumáticos. Algunos de ellos son prensas neumáticas, perforadoras neumáticas, operación de válvulas de sistemas para aire, agua o químicos, descarga de tolvas y contenedores, máquinas herramientas, apisonadores neumáticos, levantamiento y

movimiento de objetos, pintura en aerosol, sujeción en plantillas y accesorios, sujeción para soldadura fuerte o soldada, operaciones de conformado, remachado, operación de equipos de proceso, entre otros.

## **2.5 Generación de aire presurizado**

Una instalación de aire comprimido consta de dos partes: La central compresora donde el aire comprimido se produce y se prepara convenientemente para su uso y la red de distribución, que lo transporta hasta el punto de consumo.

Los compresores de aire representan una cantidad significativa de electricidad utilizada en las industrias. Los compresores de aire se utilizan en una variedad de industrias para cumplir con los requisitos del proceso, para operar herramientas y equipos neumáticos y para satisfacer las necesidades de instrumentación. Solo del 10 al 30% de la energía llega al punto de uso final, y el 70 al 90% de la energía de la potencia del motor principal se convierte en energía térmica inutilizable y, en menor medida, se pierde en forma de fricción, mal uso y ruido (Nieto & Vega, 2008), (Preditec, 2016).

Muchos compresores de aire industriales modernos se venden "empaquetados" con el compresor, el motor impulsor y muchos de los accesorios montados en un patín para facilitar la instalación. Este patín permite el movimiento con montacargas. Los paquetes más grandes pueden requerir el uso de una grúa puente. Algunos sistemas también tienen un recinto para atenuación de sonido, limpieza y estética.

Como se puede ver en la figura 2.5, hay dos tipos básicos de compresores: de desplazamiento positivo y dinámico. En el tipo de desplazamiento positivo, una cantidad determinada de aire o gas queda atrapada en una cámara de compresión y el volumen que ocupa se reduce mecánicamente, provocando un aumento correspondiente de la presión antes de la descarga. A velocidad constante, el flujo de aire permanece esencialmente constante con variaciones en la presión de descarga. Los compresores dinámicos imparten energía de velocidad al aire o gas que fluye continuamente por medio de impulsores que giran a velocidades muy altas. La energía de velocidad se

convierte en energía de presión, tanto por los impulsores como por las volutas de descarga o difusores.

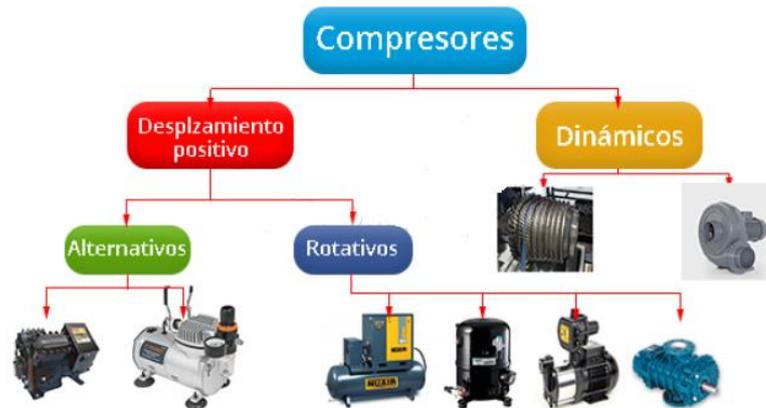


Figura 2. 5 Tipos de compresores  
Fuente. (Philco, 2019)

Los compresores de desplazamiento positivo aumentan la presión del gas al reducir el volumen. Los mismos se clasifican además como compresores alternativos y rotativos.

Los compresores dinámicos aumentan la velocidad del aire, que luego se convierte en una mayor presión en la salida. Y son básicamente compresores centrífugos y se clasifican como tipos de flujo radial y axial.

Los requisitos de caudal y presión de una aplicación dada determinan la idoneidad de un tipo particular de compresor.

### 2.5.1 Compresores alternativos

Los compresores alternativos son las más máquinas más comunes que se utilizan para la compresión de aire. Se caracterizan por una salida de flujo que permanece casi constante en un rango de presiones de descarga. Además, la capacidad del compresor es directamente proporcional a la velocidad. La salida, es pulsante. Véase la figura 2.6.

Los compresores alternativos están disponibles en muchas configuraciones, las cuatro más utilizadas son horizontal, vertical, horizontal contrapuesto y tándem. Los compresores alternativos de tipo vertical son utilizados en el rango de capacidad de 50 a 150 cfm. Los compresores opuestos de equilibrio horizontal se utilizan en el rango de capacidad de 200 a 5000 cfm en el diseño de varias etapas y hasta 10 000 cfm en los diseños de una sola etapa.

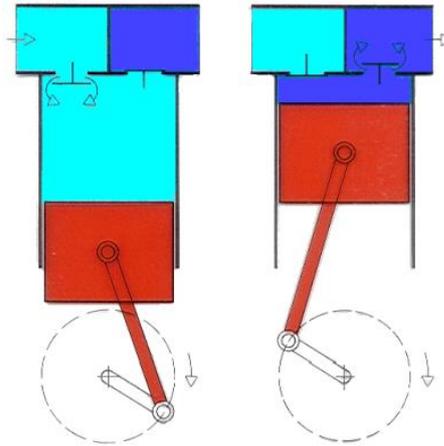


Figura 2. 6 Esquema de funcionamiento de un compresor alternativo  
Fuente. (lspat guru, 2018)

También los compresores alternativos tienen una variedad de tipos, como son:

- Lubricados y no lubricados
- Cilindro simple o múltiple
- Refrigerado por agua o aire.
- Etapa simple o múltiple

En el caso de máquinas lubricadas, el aceite debe separarse del aire de descarga. Los compresores no lubricados son especialmente útiles para proporcionar aire a la instrumentación y para procesos que requieren una descarga sin aceite. Sin embargo, las máquinas no lubricadas tienen un mayor consumo de energía específico (kW/cfm) en comparación con los tipos lubricados.

Las máquinas de un solo cilindro generalmente se enfrían con aire, mientras que las máquinas de cilindros múltiples se enfrían con agua, aunque los tipos de enfriamiento por aire de etapas múltiples están disponibles para máquinas de hasta 100 kW. Los sistemas enfriados por agua son más eficientes energéticamente que los sistemas enfriados por aire.

Las máquinas de dos etapas se utilizan para presiones altas y se caracterizan por una temperatura de descarga más baja (140 a 160 °C) en comparación con las máquinas de una etapa (205 a 240 °C). En algunos casos, las máquinas de etapas múltiples pueden tener un consumo de energía específico más bajo en comparación con las máquinas de una etapa que

funcionan con el mismo diferencial de presión total. Las máquinas de etapas múltiples generalmente tienen costos de inversión más altos, particularmente para aplicaciones con alta presión de descarga (más de 7 bar) y bajas capacidades (menos de 25 cfm). Las etapas múltiples tienen otros beneficios, como un diferencial de presión reducido en los cilindros, lo que reduce la carga y el estrés en los componentes del compresor, como válvulas y anillos de pistón.

## 2.5.2 Compresores rotativos

Los compresores rotativos son máquinas que producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo, comprimiendo el aire por empuje desde la aspiración hacia la descarga. Además, tienen rotores en lugar de pistones y brindan un aire de descarga continuo y sin pulsaciones. Están acoplados directamente al motor principal y requieren un par de arranque más bajo en comparación con la máquina alternativa. Operan a alta velocidad y generalmente proporcionan un mayor rendimiento que los compresores alternativos. Véase la figura 2.7.

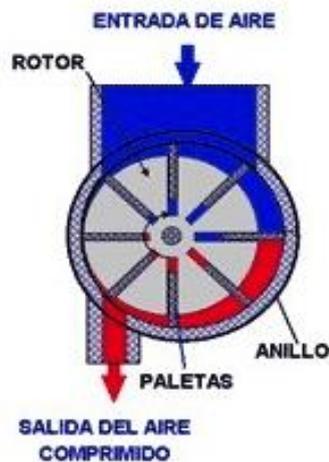


Figura 2. 7 Compresor rotativo  
Fuente. (WIDMAN INTERNATIONAL SRL, 2019)

Los compresores rotativos del tipo de tornillo son compresores de desplazamiento positivo y se componen esencialmente de un par de rotores, macho y hembra, paralelos, con lóbulos helicoidales de engranaje constante, con diferentes perfiles, que trabajan en direcciones opuestas dentro de una carcasa.

El compresor de aire rotativo está cargado de aceite lubricante helicoidal o en espiral de una sola etapa. Estos compresores constan de dos rotores, dentro de una carcasa donde los rotores comprimen el aire internamente. No hay válvulas. Estas unidades son básicamente enfriadas por aceite (con enfriadores de aceite enfriados por aire o enfriados por agua) donde el aceite sella las holguras internas.

Dado que el enfriamiento tiene lugar dentro del compresor, las piezas de trabajo nunca experimentan temperaturas de funcionamiento extremas. El aceite debe separarse del aire de descarga. Debido al diseño simple y pocas piezas de desgaste, los compresores de aire de tornillo rotativo son fáciles de mantener, operar e instalar. Véase la figura 2.8.



Figura 2. 8 Compresor de aire de tornillo  
Fuente. (Serviaire, 2021)

El compresor de aire de tornillo rotativo libre de aceite utiliza extremos de aire, especialmente diseñados para comprimir aire sin aceite en la cámara de compresión y producir aire verdaderamente libre de aceite. Estos compresores están disponibles como enfriados por aire o por agua y brindan la misma flexibilidad que los compresores rotativos inundados de aceite.

Existe un amplio rango de disponibilidad en configuración y en presión y capacidad. Los tipos secos proporcionan aire sin aceite y están disponibles en tamaños de hasta 20 000 cfm y presiones de hasta 15 bar. Los tipos lubricados están disponibles en tamaños que van desde 100 a 1000 cfm, con una presión de descarga de hasta 10 bar.

### **2.5.3 Compresores Dinámicos**

Los compresores dinámicos pueden ser Radiales (centrífugos) o de Flujo Axial. Una de las ventajas que tienen ambas es que su flujo es continuo. Estos compresores tienen pocas piezas en movimiento, reduciendo la pérdida de energía con fricción y calentamiento (Widman & Linares, 2020). Es decir, que los compresores dinámicos constan principalmente de compresores centrífugos y funcionan con principios similares a los de las bombas centrífugas. Estos compresores tienen características apreciablemente diferentes en comparación con las máquinas alternativas. Un pequeño cambio en la relación de compresión produce un cambio marcado en la salida y la eficiencia del compresor. Las máquinas centrífugas son más adecuadas para aplicaciones que requieren capacidades muy altas, normalmente por encima de 12.000 cfm.

El compresor de aire centrífugo depende de la transferencia de energía de un impulsor giratorio al aire. El rotor logra esto cambiando el impulso y la presión del aire. Este impulso se convierte en presión útil al desacelerar el aire en un difusor estacionario.

El compresor de aire centrífugo es un compresor libre de aceite por diseño. El tren de rodaje lubricado con aceite está separado del aire por juntas de eje y respiraderos atmosféricos. El centrífugo es un compresor de servicio continuo, con pocas piezas móviles, y es particularmente adecuado para aplicaciones de alto volumen, especialmente donde se requiere aire libre de aceite.

Una máquina centrífuga de una sola etapa puede proporcionar la misma capacidad que un compresor alternativo de etapas múltiples. Hay disponibles máquinas con impulsores de flujo axial o radial. Los compresores de flujo axial son adecuados para relaciones de compresión más altas y generalmente son más eficientes que los compresores radiales. Los compresores axiales suelen ser máquinas de varias etapas, mientras que las máquinas radiales suelen tener diseños de una sola etapa. La figura 2.9 muestra los compresores dinámicos centrífugo y axial.

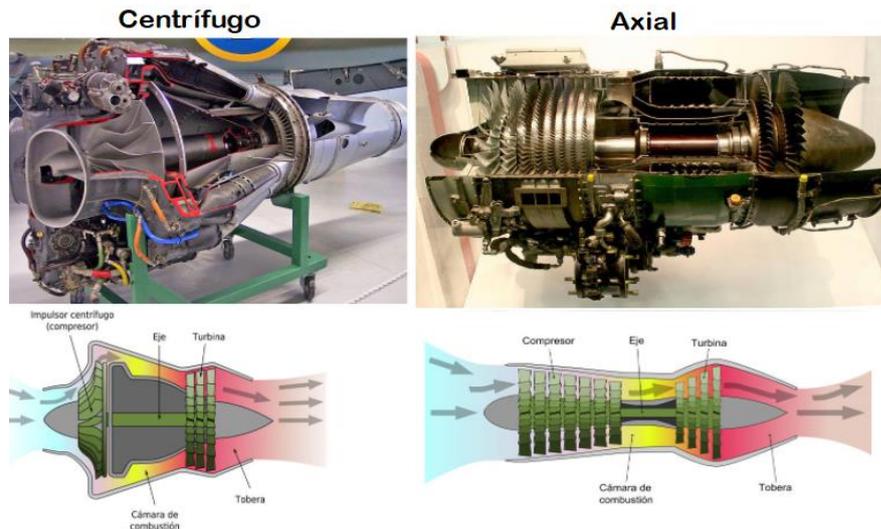


Figura 2. 9 Compresores dinámicos centrífugo y axial  
Fuente. (Ingeniería Aeronática, 2020)

A continuación, en la tabla 2.1 se puede observar los criterios generales de selección para el compresor.

Tabla 2. 1 Criterios generales de selección de compresores

Tipo de compresor	Capacidad (m <sup>3</sup> /h)		Presión (bar)	
	Desde	A	Desde	A
<b>Compresor soplador Roots de una sola etapa</b>	100	30000	0.1	1
<b>Alternativo</b>				
– Simple/Dos etapas	100	12000	0.8	12
– Multi etapa	100	12000	12.0	700
<b>Tornillo</b>				
– Etapa única	100	2400	0.8	13
– Dos etapas	100	2200	0.8	24
<b>Centrífuga</b>	600	300000	0.1	450

Fuente. El autor

## 2.6 Rendimiento del Compresor

### 2.6.1 Capacidad de un compresor

La capacidad de un compresor es el volumen nominal completo de flujo de gas comprimido y entregado en las condiciones de temperatura total, presión total y composición que prevalecen en la entrada del compresor. A veces significa tasa de flujo real, en lugar de volumen de flujo nominal. Esto también se denomina Entrega de aire libre (FAD, Free Air Delivery), es decir, aire en condiciones atmosféricas en cualquier ubicación específica. Debido a que la

altitud, el barómetro y la temperatura pueden variar en diferentes lugares y en diferentes momentos, se deduce que este término no se refiere al aire en condiciones idénticas o estándar.

### **Eficiencia Isotérmica**

$$\text{Eficiencia Isotérmica} = \frac{\text{Energía Isotérmica}}{\text{Potencia de entrada medida real}}$$

$$\text{Energía Isotérmica (kW)} = P_1 \times Q_1 \times \frac{\log_e r}{36.7}$$

$$P_1 = \text{Presión de entrada absoluta } \text{kg/cm}^2$$

$$P_2 = \text{Presión absoluta de envío } \text{kg/cm}^2$$

$$Q_1 = \text{Aire libre entregado } \text{m}^3 / \text{hr.}$$

$$r = \text{Relación de presión } P_2 / P_1$$

El cálculo de la potencia isotérmica no incluye la potencia necesaria para superar la fricción y, en general, da una eficiencia inferior a la eficiencia adiabática. El valor informado de la eficiencia es normalmente la eficiencia isotérmica. Esta es una consideración importante cuando se seleccionan compresores en función de los valores de eficiencia informados.

$$\text{Eficiencia volumétrica} = \frac{\text{Aire libre entregado (m}^3 / \text{min)}}{\text{Desplazamiento del compresor (m}^3 / \text{min)}}$$

### **Eficiencia Volumétrica**

$$\text{Desplazamiento del compresor} = \frac{\pi}{4} = D^2 \times L \times S \times X \times n$$

$$D = \text{Diámetro del cilindro, metro}$$

$$L = \text{Carrera del cilindro, metro}$$

$$S = \text{RPM de la velocidad del compresor}$$

$$X = 1 \text{ para cilindros de simple efecto y}$$

$$2 \text{ para cilindros de doble efecto}$$

$$n = \text{N}^\circ \text{ de cilindros}$$

A efectos prácticos, la guía más eficaz para comparar las eficiencias de los compresores es el consumo de energía específico, es decir, kW/tasa de flujo

de volumen, para diferentes compresores que proporcionarían el mismo servicio.

## **2.7 Operación eficiente de los sistemas de aire comprimido**

### **Ubicación de compresores**

La ubicación de los compresores de aire y la calidad del aire aspirado por los compresores tendrán una influencia significativa en la cantidad de energía consumida. El rendimiento del compresor como máquina de respiración mejora con aire fresco, limpio y seco en la entrada.

### **Entrada de aire frío**

Como regla general, "cada aumento de 4°C en la temperatura del aire de entrada da como resultado un mayor consumo de energía en un 1% para lograr una salida equivalente". Por lo tanto, la entrada de aire frío conduce a una compresión más eficiente, tal como se puede ver en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Efecto de la temperatura del aire de admisión en el consumo de energía

<b>Temperatura de entrada (°C)</b>	<b>Suministro de aire relativo (%)</b>	<b>Energía ahorrada (%)</b>
10.0	102.0	+ 1.4
15.5	100.0	Nil
21.1	98.1	- 1.3
26.6	96.3	- 2.5
32.2	94.1	- 4.0
37.7	92.8	- 5.0
43.3	91.2	- 5.8

Fuente. El autor

Es preferible extraer aire fresco del exterior, ya que la temperatura del aire dentro de la sala del compresor será unos grados más alta que la temperatura ambiente. Al extender la toma de aire hacia el exterior del edificio, se debe tener cuidado para minimizar la caída de presión excesiva en la línea de succión, seleccionando un conducto de mayor diámetro con un número mínimo de curvas.

### **Entrada de aire libre de polvo**

El polvo en el aire de succión provoca un desgaste excesivo de las piezas móviles y provoca el mal funcionamiento de las válvulas debido a la abrasión. Se deben proporcionar filtros de aire adecuados en el lado de succión. Los filtros de aire deben tener una alta capacidad de separación de polvo, caídas

de presión bajas y un diseño robusto para evitar la limpieza y el reemplazo frecuentes. La tabla 2.3 muestra el efecto de la caída de presión en el filtro de aire sobre el consumo de energía.

Los filtros de aire deben seleccionarse en función del tipo de compresor e instalarse lo más cerca posible del compresor. Como regla general, "por cada aumento de caída de presión de 250 mm de columna de agua en la ruta de succión debido a filtros obstruidos, etc., el consumo de energía del compresor aumenta aproximadamente un 2% para la misma salida".

Por lo tanto, es recomendable limpiar los filtros de aire de entrada a intervalos regulares para minimizar las caídas de presión. Se pueden proporcionar manómetros o medidores de presión diferencial a través de los filtros para monitorear las caídas de presión a fin de planificar los programas de limpieza del filtro.

Tabla 2. 3 Efecto de la caída de presión a través del filtro de entrada de aire sobre el consumo de energía

Caída de presión en el filtro de aire (mmWC)	Aumento en el consumo de energía (%)
0	0
200	1.6
400	3.2
600	4.7
800	7.0

Fuente. El autor

### Entrada de aire seco

El aire atmosférico siempre contiene cierta cantidad de vapor de agua, dependiendo de la humedad relativa, siendo alta en clima húmedo. El nivel de humedad también será alto si el aire se extrae de un área húmeda; por ejemplo, si se ubica el compresor cerca de la torre de enfriamiento o si se debe evitar el escape del secador, tal como muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4 Humedad en el aire ambiente en varios niveles de humedad

% Humedad relativa	Kg de vapor de agua por hora por cada 1000 m <sup>3</sup> /min. de aire a 30°C
50	27.60
80	45.00
100	68.22

Fuente. El autor

La capacidad del aire para transportar humedad aumenta con el aumento de la temperatura y disminuye con el aumento de la presión.

## Elevación

La altitud de un lugar tiene un impacto directo en la eficiencia volumétrica del compresor. El efecto de la altitud sobre la eficiencia volumétrica se muestra en la tabla 2.5. Es evidente que los compresores ubicados a mayor altura consumen más energía para lograr una determinada presión de entrega que los que se encuentran al nivel del mar, ya que la relación de compresión es mayor.

Tabla 2. 5 Efecto de la altitud en la eficiencia volumétrica

Metros de altitud	Presión barométrica milibar*	Porcentaje de eficiencia volumétrica relativa en comparación con el nivel del mar	
		A 4 bares	A 7 bares
Nivel del mar	1013	100.0	100.0
500	945	98.7	97.7
1000	894	97.0	95.2
1500	840	95.5	92.7
2000	789	93.9	90.0
2500	737	92.1	87.0

\* 1 milli bar =  $1.01972 \times 10^{-3}$  kg/cm<sup>2</sup>

Fuente. El autor

El uso de agua tratada o la purga periódica de una parte del agua de refrigeración (purga) puede mantener los niveles de TDS dentro de límites aceptables. Es mejor mantener el pH del agua mediante la adición de productos químicos y evitar el crecimiento microbiano mediante la adición de fungicidas y alguicidas.

## Eficacia de Inter y After Coolers

La eficacia es un indicador del rendimiento del intercambio de calor: qué tan bien están funcionando los intercoolers y los after-coolers.

Los refrigeradores intermedios se proporcionan entre etapas sucesivas de un compresor de etapas múltiples para reducir el trabajo de compresión (requisitos de energía), al reducir el volumen específico mediante el enfriamiento del aire, además de la separación de la humedad.

Idealmente, la temperatura del aire de entrada en cada etapa de una máquina de etapas múltiples debería ser la misma que en la primera etapa. Esto se conoce como "enfriamiento perfecto" o compresión isotérmica. El enfriamiento puede ser imperfecto debido a las razones descritas en secciones anteriores. Por lo tanto, en la práctica real, las temperaturas del aire de entrada en las etapas posteriores son más altas que los niveles normales, lo que da como resultado un mayor consumo de energía, ya que se maneja un volumen mayor para el mismo servicio. Véase la tabla 2.6.

Tabla 2. 6 Enfriamiento entre etapas de un compresor alternativo

Detalles	Enfriamiento imperfecto	Enfriamiento perfecto (valor base)	Enfriamiento por agua enfriada
Temperatura de entrada de la primera etapa °C	21.1	21.1	21.1
Temperatura de entrada de la segunda etapa °C	26.6	21.1	15.5
Capacidad (Nm <sup>3</sup> /min)	15.5	15.6	15.7
Potencia del eje (kW)	76.3	75.3	74.2
Consumo específico de energía (kWh/Nm <sup>3</sup> /min)	4.9	4.8	4.7
Cambio porcentual	+ 2.1	Referencia	-2.1

Fuente. El autor

Puede verse en la tabla 2.6 que un aumento de 5.5 °C en la temperatura del aire de entrada a la segunda etapa da como resultado un aumento del 2% en el consumo específico de energía. El uso de agua a menor temperatura reduce el consumo específico de energía. Sin embargo, una temperatura muy baja del agua de refrigeración podría provocar la condensación de humedad en el aire, que si no se elimina provocaría daños en el cilindro. De manera similar, el enfriamiento inadecuado en los refrigeradores posteriores (debido a incrustaciones, incrustaciones, etc.), permite que entre aire cálido y húmedo en el receptor, lo que provoca más condensación en los receptores de aire y las líneas de distribución, lo que, en consecuencia, conduce a una mayor corrosión, caídas de presión y fugas en tuberías y equipos de uso final. Por lo tanto, es necesario realizar una limpieza periódica y asegurar un flujo adecuado a la temperatura adecuada tanto de los refrigeradores intermedios como de los refrigeradores posteriores para mantener el rendimiento deseado. El requerimiento típico de agua de enfriamiento se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2. 7 Requisitos típicos de agua de enfriamiento

Tipo de compresor	Cantidad mínima de agua de refrigeración necesaria (en litros por minuto) para 2,85 m <sup>3</sup> /min. <i>Free Air Delivery, (FAD) a 7 bares</i>
Etapa única	3.8
Dos etapas	7.6
Etapa única con refrigerador posterior	15.1
Dos etapas con refrigerador posterior	18.9

Fuente. El autor

### Ajustes de presión

El compresor opera entre rangos de presión llamados presiones de carga (conexión) y descarga (corte). Por ejemplo, un compresor que funciona con un ajuste de presión de 6 a 7 kg/cm<sup>2</sup> significa que el compresor descarga a 7 kg/cm<sup>2</sup> y carga a 6 kg/cm<sup>2</sup>. La carga y descarga se realiza mediante un interruptor de presión.

Para la misma capacidad, un compresor consume más energía a presiones más altas. No deben operarse por encima de sus presiones operativas óptimas, ya que esto no solo desperdicia energía, sino que también conduce a un desgaste excesivo, lo que genera un mayor desperdicio de energía. La eficiencia volumétrica de un compresor también es menor a presiones de entrega más altas.

Tabla 2. 8 Ahorro de energía típico a través de la reducción de presión

Reducción de presión		Ahorro de energía (%)		
Desde (barra)	A (barra)	Etapa única Refrigerado por agua	Dos etapas Refrigerado por agua	Dos etapas Refrigerado por aire
6.8	6.1	4	4	2.6
6.8	5.5	9	11	6.5

Fuente. El autor

### Reducción de la presión de entrega:

La posibilidad de reducir (optimizar) los ajustes de presión de suministro deben explorarse mediante un estudio cuidadoso de los requisitos de presión de varios equipos y la caída de presión en la línea entre los puntos de

generación y utilización de aire comprimido. Los ahorros típicos de energía a través de la reducción de presión se muestran en la tabla 2.8.

Los interruptores de presión deben ajustarse de manera que el compresor se conecte y desconecte a niveles óptimos.

Una reducción en la presión de entrega de 1 bar en un compresor reduciría el consumo de energía en 6 -10%.

### **Modulación del compresor por ajustes de presión óptimos:**

Muy a menudo en una industria, diferentes tipos, capacidades y marcas de compresores están conectados a una red de distribución común. En tales situaciones, la selección adecuada de una combinación correcta de compresores y la modulación óptima de diferentes compresores pueden ahorrar energía.

Cuando más de un compresor alimenta un cabezal común, los compresores deben operarse de tal manera que el costo de generación de aire comprimido sea mínimo.

- Si todos los compresores son similares, la configuración de presión se puede ajustar de manera que solo un compresor maneje la variación de carga, mientras que los demás funcionan más o menos a plena carga.
- Si los compresores son de diferentes tamaños, el interruptor de presión debe configurarse de tal manera que solo se permita modular (variar el caudal) al compresor más pequeño.
- Si se operan juntos diferentes tipos de compresores, los consumos de energía de descarga son significativos. Se debe modular el compresor con menor potencia sin carga.
- En general, se debe modular el compresor con menor consumo de energía a carga parcial.
- Los compresores se pueden clasificar de acuerdo con su consumo de energía específico, a diferentes presiones y deben fabricarse eficientemente energéticamente para satisfacer la mayor parte de la demanda (véase la tabla 2.9).

Tabla 2. 9 Consumo de energía específico típico de los compresores alternativos

Barra de presión	Nº de etapas	Potencia Específica kW/170 m <sup>3</sup> /hora (kW/100 cfm)
1	1	6.29
2	1	9.64
3	1	13.04
4	2	14.57
7	2	18.34
8	2	19.16
10	2	21.74
15	2	26.22

Fuente. El autor

## 2.8 Sopladores en lugar del sistema de aire comprimido

Dado que el sistema de aire comprimido ya está disponible, el ingeniero de la planta puede verse tentado a utilizar aire comprimido para proporcionar aire para aplicaciones de baja presión, como agitación, transporte neumático o aire de combustión. El uso de un soplador diseñado para operar a baja presión costará solo una fracción de la energía y el costo de la generación de aire comprimido.

### Control de Capacidad de Compresores

En muchas instalaciones, el uso de aire es intermitente. Por lo tanto, es necesario algún medio para controlar el flujo de salida del compresor. El tipo de control de capacidad elegido tiene un impacto directo en el consumo de energía del compresor. Algunos esquemas de control comúnmente utilizados se detallan a continuación:

#### Control automático de encendido/apagado:

El control automático de encendido/apagado, como su nombre lo indica, arranca o detiene el compresor por medio de un interruptor activado por presión a medida que varía la demanda de aire. Este es un método muy eficiente para controlar la capacidad del compresor, donde se eliminan las pérdidas por marcha en vacío del motor, ya que apaga completamente el motor cuando se alcanza la presión establecida. Este control es adecuado para compresores pequeños.

### **Carga y descarga:**

Este es un control de dos pasos donde el compresor se carga cuando hay demanda de aire y se descarga cuando no hay demanda de aire. Durante la descarga, un compresor de desplazamiento positivo puede consumir hasta un 30% de la potencia a plena carga, según el tipo, la configuración, la operación y las prácticas de mantenimiento.

### **Control de varios pasos:**

Los compresores alternativos de gran capacidad suelen estar equipados con un control de varios pasos. En este tipo de control, la descarga se realiza en una serie de pasos (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) que varían desde carga completa hasta vacío. Véase la tabla 2.10.

Tabla 2. 10 Consumo de un compresor alternativo típico con varias cargas

<b>Carga %</b>	<b>Consumo de energía como % de la potencia a plena carga</b>
100	100
75	76-77
50	52-53
25	27-29
0	10-12

Fuente. El autor

### **Control de estrangulamiento:**

La capacidad de los compresores centrífugos se puede controlar mediante paletas guía de entrada variable. Sin embargo, otra forma eficiente de hacer coincidir la salida del compresor para cumplir con los requisitos de carga variables es mediante el control de velocidad. Véase la tabla 2.11.

Tabla 2. 11 Compresión de gas con carga parcial típica:

<b>Volumen del sistema, %</b>	<b>Entrada de alimentación (%) Control de velocidad</b>	<b>Entrada de alimentación (%) Control de paletas</b>
111	120	-
100	100	100
80	76	81
60	59	64
40	55	50
20	51	46
0	47	43

Fuente. El autor

Con un flujo volumétrico bajo (por debajo del 40%), el control de paletas puede resultar en una entrada de energía más baja en comparación con el control de velocidad debido a la baja eficiencia del sistema de control de velocidad. Para cargas superiores al 40%, se recomienda el control de velocidad.

### **Evitar el mal uso del aire comprimido:**

Se debe desaconsejar el mal uso del aire comprimido para propósitos como limpieza de carrocerías, agitación de líquidos, limpieza de pisos, secado, enfriamiento de equipos y otros usos similares. Siempre que sea posible, el aire a baja presión de un soplador debe sustituirse por aire comprimido, por ejemplo, aire secundario para la combustión en una caldera/horno.

La tabla 2.12 muestra los ahorros al dejar de usar aire comprimido eligiendo métodos alternativos para realizar la misma tarea.

- ✓ Los motores eléctricos pueden servir de manera más eficiente que los dispositivos rotativos accionados por aire, donde corresponda. La tabla ofrece la comparación de las amoladoras neumáticas y las amoladoras eléctricas.

Tabla 2. 12 Requisitos de energía típicos para herramientas neumáticas y eléctricas

Herramienta	Diámetro de la rueda mm	RPM de velocidad	Aire Cons.m <sup>3</sup> /h	kW de potencia
Amoladora angular neumática	150	6000	102 m <sup>3</sup> /h at 6 bar	10.2
Amoladora angular eléctrica	150	5700 - 8600	N. A.	1.95 – 2.90
Amoladora neumática de chorro	35	30000	32.3 m <sup>3</sup> /h at 6 bar	3.59
Amoladora eléctrica recta	25	22900 - 30500	N. A.	0.18

Fuente. El autor

Cabe señalar que en algunas áreas no se permite el uso de herramientas eléctricas debido a restricciones de seguridad, especialmente en lugares donde hay vapores inflamables presentes en el ambiente. Siempre se debe recordar que la consideración de seguridad siempre prevalece sobre la conservación de energía.

- ✓ En lugar de polipastos neumáticos, se pueden utilizar polipastos eléctricos.
- ✓ Las aplicaciones de transporte de materiales mediante sistemas de soplantes pueden sustituirse preferentemente por una combinación de transportadores de cinta/tornillo y elevadores de cangilones. En una planta de fabricación de papel, se utiliza aire comprimido para transportar astillas de madera. El consumo de energía equivalente fue de 77 kW. Este método de transporte fue reemplazado por un sistema de soplado que consumía solo 7 kW, un ahorro de 70 kW. Esto también se ha aplicado ampliamente en Industria del cemento donde el transporte neumático ha sido reemplazado por transportadores de cangilones y tornillos, lo que ha resultado en una reducción significativa de energía.
- ✓ Cuando realmente se requiere aire en movimiento para una aplicación, a menudo otras fuentes distintas al aire comprimido pueden hacer el trabajo. Para aplicaciones como el soplado de componentes, puede ser posible el uso de amplificadores de aire comprimido, sopladores o sistemas basados en la gravedad. Los cepillos pueden barrer los desechos del trabajo en curso con la misma eficacia que el aire a alta presión. Los sopladores también se pueden utilizar para dicho propósito. Muchas aplicaciones no requieren aire comprimido limpio, seco, de alta presión y costoso de 6 bar o 7 bar, sino que solo se necesita aire en movimiento para eliminar los desechos, proporcionar refrigeración u otras funciones. En estos casos, los ventiladores o sopladores de aire locales pueden satisfacer la necesidad de mover el aire de manera muy económica. Si una manguera de ¼" se mantiene abierta en una línea de aire comprimido de 7 bar para limpiarla durante al menos 1000 horas/año, puede generar costos significativos. Si es absolutamente necesario, se debe usar aire comprimido solo con pistolas de aire para mantener la presión del aire por debajo de 2 bar.
- ✓ Para aplicaciones en las que el aire comprimido es indispensable para limpiar las grietas internas de las máquinas, etc., se puede considerar la instalación de un cabezal de aire de limpieza separado con una válvula de aislamiento principal. La válvula principal debe abrirse solo durante unos pocos períodos de tiempo bien definidos durante todo el día; no se deben

proporcionar conexiones para la limpieza desde las líneas de aire del proceso o del equipo.

- ✓ Se puede considerar el reemplazo de cilindros de aire operados neumáticamente por paquetes de energía hidráulica.
- ✓ Los sistemas de vacío son mucho más eficientes que los costosos métodos Venturi, que usan aire comprimido costoso que pasa por un orificio para crear un vacío.
- ✓ Los agitadores mecánicos, los transportadores y el aire a baja presión mezclarán los materiales mucho más económicamente que el aire comprimido a alta presión.

### **Evitar fugas de aire y desperdicio de energía:**

La mayor oportunidad para ahorrar energía está en la prevención de fugas en el sistema de aire comprimido. Las fugas ocurren con frecuencia en los depósitos de aire, las válvulas de alivio, las uniones de tuberías y mangueras, las válvulas de cierre, los acoplamientos de liberación rápida, las herramientas y los equipos. En la mayoría de los casos, se deben a un mantenimiento deficiente y, en ocasiones, a instalaciones incorrectas, entre otros.

### **Fugas de aire a través de orificios de diferentes tamaños**

La tabla 2.13 muestra la cantidad de aire libre desperdiciado para diferentes tamaños y presiones de boquillas.

Tabla 2. 13 Descarga de aire (m<sup>3</sup>/minuto) por orificio (constante orificio  $c_d = 1.0$ )

<b>Presión manométrica Bar</b>	<b>0.5 mm</b>	<b>1 mm</b>	<b>2 mm</b>	<b>3 mm</b>	<b>5 mm</b>	<b>10 mm</b>	<b>12.5 mm</b>
0.5	0.06	0.22	0.92	2.1	5.7	22.8	35.5
1.0	0.08	0.33	1.33	3.0	8.4	33.6	52.5
2.5	0.14	0.58	2.33	5.5	14.6	58.6	91.4
5.0	0.25	0.97	3.92	8.8	24.43	97.5	152.0
7.0	0.33	1.31	5.19	11.6	32.5	129.0	202.0

Fuente. El autor

### **Detección de fugas por detector de fugas ultrasónico:**

Las pruebas de fugas son realizadas por un detector de fugas que tiene una sonda de detección, que detecta cuando hay fugas en sistemas de aire

comprimido a altas temperaturas, debajo de cubiertas aisladas, tuberías, colectores, etc.

La fuga se detecta por vibración ultrasónica. La prueba de fugas se realiza mediante la observación y localización de fuentes de vibraciones ultrasónicas creadas por el flujo turbulento de gases que pasan a través de fugas en sistemas presurizados o evacuados.

### **Trampas y separadores de humedad de línea**

Aunque, en un sistema ideal, todo el enfriamiento y la condensación del aire deben realizarse antes de que el aire salga del receptor, esto no se logra muy a menudo en la práctica. La cantidad de condensación que se produce en las líneas depende de la eficacia de la extracción de humedad antes de que el aire salga del receptor y de la temperatura en la propia red. En general, la tubería principal de aire debe tener una caída de no menos de 1m en 100m en la dirección del flujo de aire, y la distancia entre los puntos de drenaje no debe exceder los 30m.

Los puntos de drenaje deben proporcionarse usando T iguales, ya que ayuda en la separación del agua. Siempre que se desmonte un ramal de la red, se debe dejar por la parte superior para que el agua de la red principal no caiga directamente en los equipos de la planta. Además, también se debe drenar la parte inferior de la tubería que cae.

### **Filtro de aire comprimido**

Aunque los separadores y trampas en la red principal eliminan algo de agua, aceite y suciedad, siempre quedan algunos, que se transportan junto con el aire comprimido. Además, los sistemas de tuberías acumulan incrustaciones y otras materias extrañas, como pequeños trozos de material de juntas, compuestos para juntas, etc. El aceite de compresor quemado también puede pasar a las tuberías y esto, junto con otros contaminantes, forma una sustancia gomosa. Para eliminarlos, todos los cuales pueden tener efectos nocivos en los equipos neumáticos, el aire debe filtrarse lo más cerca posible del punto de uso. El agua y el aceite acumulados en el sumidero del filtro deben drenarse; porque si se permite que el nivel se acumule, es forzado a

través del elemento de filtro hacia el mismo sistema que está diseñado para proteger.

### **Reguladores**

En muchos casos, las operaciones neumáticas deben realizarse a una presión más baja que la del suministro principal. Para estas aplicaciones, se requieren reguladores de presión para reducir la presión al valor requerido y también para garantizar que permanezca razonablemente constante en el punto de uso.

### **Lubricadores**

Cuando se utilice aire para accionar motores primarios, cilindros y válvulas, estos deben estar equipados con un lubricador. Esencialmente, un lubricador es un depósito de aceite y ha sido diseñado para que cuando el aire fluya, se alimente una cantidad medida de aceite en forma de niebla en la corriente de aire. Este aceite se transporta con el aire motor, hasta el punto de uso para lubricar todas las partes móviles. Todos los lubricadores requieren una cierta tasa mínima de flujo de aire para inducir el aceite en su corriente. Es recomendable instalar filtros, reguladores y lubricadores lo más cerca posible del equipo que se está sirviendo.

### **Secadores de aire**

Hay ciertas aplicaciones en las que el aire debe estar libre de humedad y tener un punto de rocío más bajo. El punto de rocío es la temperatura a la que se condensa la humedad. Esto requiere métodos más sofisticados y costosos para reducir el punto de rocío del aire comprimido. Los tres tipos comunes de secadores de aire utilizados son los secadores sin calor (absorción), adsorción y frigoríficos. Producen aire seco con un punto de rocío de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , según el tipo de secador.

La tabla 2.14 muestra el contenido de humedad en el aire y la tabla 2.15 muestra el punto de rocío a presión típico y los datos de consumo de energía de las secadoras.

Tabla 2. 14 Contenido de humedad en el aire

Punto de rocío a presión atmosférica °C	Contenido de humedad, ppm
0	3800
-5	2500
-10	1600
-20	685
-30	234
-40	80
-60	6.5

Fuente. El autor

Tabla 2. 15 Punto de rocío a presión típico y datos de consumo de energía para secadoras

Tipo de secador	Punto de rocío atmosférico °C	Primer costo	Costo operacional	Consumo de energía para 1000 m <sup>3</sup> /hr
Refrigeración	-20	Bajo	Bajo	2.9 kW
Desecante regenerativo (por purga de aire comprimido)	-20	Bajo	Alto	20.7 kW
Desecante regenerativo (calentamiento externo o interno con calentador eléctrico o de vapor, purga de aire comprimido reducida o nula)	-40	Medio	Medio	18.0 kW
Desecante regenerativo (usando aire calentado a baja presión, sin pérdida de aire comprimido)	-40	Alto	Bajo	12.0 kW
Desecante regenerativo (por recuperación del calor de compresión del aire comprimido)	-40	Alto	Muy bajo	0.8 kW

Fuente. El autor

## Receptores de Aire

El depósito de aire amortigua las pulsaciones que ingresan a la línea de descarga del compresor; sirve como depósito para demandas repentinas o inusualmente altas que exceden la capacidad del compresor; evita cargas y descargas demasiado frecuentes (ciclos cortos) del compresor; y separa la humedad y el vapor de aceite, permitiendo que la humedad transportada desde los enfriadores posteriores se precipite. El depósito de aire debe tener un tamaño generoso para brindar una gran superficie de enfriamiento e igualar la pulsación en la presión de aire suministrada por el compresor alternativo. Las fórmulas simples que se citan a menudo para el tamaño del depósito de aire es tomar un valor igual a la salida continua de un minuto del compresor. Sin embargo, esto debe considerarse indicativo del tamaño mínimo del receptor. Otra aproximación puede ser dimensionar el volumen del receptor para que sea el 5% de la salida nominal de aire libre por hora. Proporcionar un receptor de aire cerca del extremo de la carga, donde hay una gran

demanda repentina que dura un período corto, evitaría la necesidad de proporcionar capacidad adicional.

### **Pérdida de presión de aire debido a la fricción**

La pérdida de presión en las tuberías se debe a la resistencia de los accesorios y válvulas de las tuberías, que disipa energía al producir turbulencias. El sistema de tuberías se diseñará para una caída de presión máxima permitida del 5% desde el compresor hasta el punto de uso más distante.

### **Disposición de tuberías**

Siempre que sea posible, el sistema de tuberías debe disponerse como un circuito cerrado o "anillo principal" para permitir una distribución de aire más uniforme a los puntos de consumo y para igualar la presión en las tuberías. Los servicios separados que requieran un gran consumo de aire y que se encuentren a largas distancias de la unidad compresora deben ser suministrados por líneas aéreas principales separadas. Las tuberías deben instalarse paralelas a las líneas del edificio, con cabeceras principales y secundarias inclinadas hacia un callejón sin salida. Se instalarán trampas en las líneas aéreas en todos los puntos bajos y callejones sin salida para eliminar la humedad condensada. Las trampas automáticas de humedad que se utilizan para este propósito son efectivas solo cuando el aire se ha enfriado y la humedad se ha precipitado. Los cabezales de derivación de las tuberías principales de aire comprimido se quitarán en la parte superior para evitar que se acumule humedad.

### **Utilización de la capacidad**

En muchas instalaciones, el uso de aire es intermitente. Esto significa que el compresor funcionará con carga baja o sin carga, lo que aumenta el consumo de energía específico por unidad de aire generado. Por lo tanto, para un consumo de energía óptimo, se debe seleccionar un control de capacidad del compresor adecuado. La naturaleza del dispositivo de control depende de la función a regular. Uno de los objetivos de un buen sistema de gestión de aire comprimido sería minimizar al mínimo la descarga ya que la descarga consume hasta un 30% de la potencia a plena carga.

Una forma de hacerlo es usar un compresor más pequeño. Los compresores descentralizados, a diferencia de los compresores centralizados, a menudo sirven mejor para este propósito al tener la opción de apagarse cuando no se necesita aire en una sección/equipo en particular. Si un compresor está sobredimensionado y funciona en modo de descarga durante períodos prolongados, una forma económica será cambiar adecuadamente el tamaño de la polea del motor o compresor y reducir las RPM para reducir la capacidad nominal del compresor.

Con la disminución del costo de los variadores de velocidad, se ha convertido en una opción viable para mantener una presión constante en el sistema y evitar las operaciones de descarga variando la velocidad del compresor. Sin embargo, se debe tener precaución para operaciones a velocidades muy bajas, ya que afectará el sistema de lubricación. Esto se puede solucionar proporcionando un sistema de aceite lubricante independiente del compresor.

## **2.9 Verificación para la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido**

- ❖ Asegúrese de que la entrada de aire al compresor no esté caliente ni húmeda ubicando los compresores en un área bien ventilada o extrayendo aire frío del exterior. Cada aumento de 4°C en la temperatura del aire de entrada aumentará el consumo de energía en un 1%.
- ❖ Limpie los filtros de entrada de aire con regularidad. La eficiencia del compresor se reducirá en un 2 % por cada caída de presión de 250 mm WC a través del filtro.
- ❖ Mantenga las válvulas del compresor en buenas condiciones quitándolas e inspeccionándolas una vez cada seis meses. Las válvulas desgastadas pueden reducir la eficiencia del compresor hasta en un 50%.
- ❖ Instale manómetros a lo largo del filtro y controle la caída de presión como guía para el reemplazo del elemento.
- ❖ Minimizar el funcionamiento del compresor con carga baja; si la demanda de aire es inferior al 50% de la capacidad del compresor, considere cambiar a un compresor más pequeño o reducir la velocidad

del compresor adecuadamente (reduciendo el tamaño de la polea del motor) en el caso de compresores accionados por correa.

- ❖ Considere el uso de secadores de aire regenerativos, que utilizan el calor del aire comprimido para eliminar la humedad.
- ❖ Los inter-enfriadores sucios reducen la eficiencia del compresor y provocan más condensación de agua en los depósitos de aire y las líneas de distribución, lo que aumenta la corrosión. Se debe garantizar la limpieza periódica de los intercoolers.
- ❖ La prueba de suministro de aire libre (*Free Air Delivery*, FAD) del compresor se debe realizar periódicamente para comparar la capacidad operativa actual con su capacidad de diseño y se deben tomar medidas correctivas si es necesario.
- ❖ Si más de un compresor está alimentando a un cabezal común, los compresores deben operarse de tal manera que solo un compresor pequeño pueda manejar las variaciones de carga mientras que otros compresores operarán a plena carga.
- ❖ La posibilidad de recuperación de calor del aire comprimido caliente para generar aire caliente o agua para la aplicación del proceso debe analizarse económicamente en el caso de compresores grandes.
- ❖ Se debe considerar el compresor de dos o varias etapas, ya que consume menos energía para la misma salida de aire que un compresor de una sola etapa.
- ❖ Si los requisitos de presión para los procesos son muy diferentes (por ejemplo, de 3 bar a 7 bar), se recomienda tener dos sistemas de aire comprimido separados.
- ❖ Reducir la presión de entrega del compresor, siempre que sea posible, para ahorrar energía.
- ❖ Proporcione depósitos de aire adicionales en los puntos de alta demanda de aire cíclico que permitan el funcionamiento sin capacidad adicional del compresor.
- ❖ Realice modificaciones con variadores de velocidad en compresores grandes, podría ser uno de más de 100 kW, para eliminar por completo la condición de funcionamiento "descargado".

- ❖ Mantenga el rango mínimo posible entre los ajustes de presión de carga y descarga.
- ❖ Las trampas de drenaje automáticas controladas por temporizador desperdician aire comprimido cada vez que se abre la válvula. Por lo tanto, la frecuencia de drenaje debe optimizarse.
- ❖ Revise los registros del compresor de aire con regularidad para detectar lecturas anormales, especialmente el flujo y la temperatura del agua de enfriamiento de la corriente del motor, las presiones y temperaturas entre etapas y de descarga y el ciclo de carga del compresor.
- ❖ Las fugas de aire comprimido del 40 al 50% no son infrecuentes. Realice pruebas periódicas de fugas para estimar la cantidad de fugas.
- ❖ Instale válvulas de corte de solenoide enclavadas en el equipo en el sistema de aire para que el suministro de aire a una máquina se pueda apagar cuando no esté en uso.
- ❖ Los precios actuales de la energía justifican diseños liberales de tamaños de tuberías para reducir las caídas de presión.
- ❖ El diseño de la tubería de aire comprimido debe hacerse preferiblemente como un anillo principal para proporcionar las presiones deseadas para todos los usuarios.
- ❖ Se puede instalar un compresor dedicado más pequeño en el punto de carga, ubicado lejos de la casa del compresor central, en lugar de suministrar aire a través de tuberías largas.
- ❖ Todos los equipos neumáticos deben estar correctamente lubricados, lo que reducirá la fricción, evitará el desgaste de los sellos y otras piezas de goma y así evitará el desperdicio de energía debido al consumo excesivo de aire o fugas.
- ❖ Se debe desaconsejar el mal uso del aire comprimido, como limpieza de carrocerías, agitación, limpieza general de pisos y otras aplicaciones similares, a fin de ahorrar aire comprimido y energía.
- ❖ El equipo neumático no debe operarse por encima de la presión de funcionamiento recomendada, ya que esto no solo desperdicia energía, sino que también puede provocar un desgaste excesivo de los componentes del equipo, lo que conduce a un mayor desperdicio de energía.

- ❖ El transporte neumático debe ser reemplazado por un sistema mecánico ya que el primero consume alrededor de 8 veces más energía. La mayor posibilidad de ahorro de energía es mediante la reducción del uso de aire comprimido.
- ❖ Las herramientas neumáticas, como taladros y amoladoras, consumen una 20 veces más energía que las herramientas accionadas por motor. Por lo tanto, tienen que ser utilizados de manera eficiente. Siempre que sea posible, deben reemplazarse con herramientas eléctricas.
- ❖ Siempre que sea posible, la soldadura es una buena práctica y debe preferirse a las conexiones roscadas.
- ❖ Debido a la alta caída de presión, las válvulas de bola, de tapón o de compuerta son preferibles a las válvulas de globo en las líneas de aire comprimido.

## **2.10 Norma ISO 11011**

La norma ISO 11011 presentada en agosto de 2013, contiene un marco para la evaluación y auditoría de los sistemas de aire comprimido para ayudar a estandarizar las auditorías energéticas que ofrecen los fabricantes de compresores de aire y los proveedores de equipos de aire comprimido.

Su objetivo principal es alentar a las empresas a evaluar sus sistemas de aire comprimido a través de empresas que realizan auditorías energéticas de acuerdo con las nuevas directrices y, posteriormente, tomar las medidas recomendadas para reducir su consumo de energía.

### **2.10.1 Beneficios de la norma ISO 11011**

Durante algunos años, los fabricantes y proveedores responsables de equipos de aire comprimido han estado ofreciendo a los clientes auditorías energéticas como parte de su oferta de servicios, junto con ejercicios de registro de datos y encuestas de detección de fugas.

Antes de ISO 11011, faltaban estándares y pautas de la industria, por lo que las auditorías energéticas variaban. Los fabricantes y proveedores individuales tenían que decidir por sí mismos cómo medir el consumo de energía del compresor de aire y qué recomendaciones hacer a sus clientes.

Sin embargo, con la llegada de la norma ISO 11011, los fabricantes y proveedores de energía ahora deben ofrecer consejos similares y llevar a cabo los mismos procedimientos de evaluación y auditoría en igualdad de condiciones. Las auditorías energéticas comparables solo pueden ser beneficiosas para el cliente y deben facilitarles mucho la decisión de qué acción tomar.

Por tal razón, se debería adoptarlo, ya que los sistemas de aire comprimido no siempre funcionan a su máximo potencial, y los siguientes factores afectan los niveles de eficiencia:

- Equipo especificado incorrectamente
- Fugas
- Tuberías mal dimensionadas
- Largas distancias
- Curvas y accesorios excesivos
- Uso inapropiado

Desafortunadamente, no siempre se tiene en cuenta la cantidad de energía utilizada por un compresor de aire, aunque el aire comprimido se usa ampliamente y en realidad se considera la cuarta utilidad de la industria. Es probable que la gran mayoría de las empresas no sepan cuánto aire comprimido utilizan, cuánto les cuesta, o incluso si sus compresores de aire son apropiados para sus procesos de producción.

No obstante, se recomienda repetidamente que vea el valor de evaluar su uso de aire comprimido dentro del marco estandarizado ISO 11011, especialmente antes de invertir en un nuevo compresor de aire. Esto no solo generará ahorros de energía y una reducción en sus emisiones de carbono, sino que también podría ser beneficioso cuando intente demostrar sus credenciales ambientales a sus clientes potenciales.

### **2.11 La eficiencia energética según FESTO**

Los servicios de ahorro de energía de Festo tienen un diseño modular para que puedan cumplir con precisión sus requisitos específicos. Se elige si se quiere aprovechar Pre-Audición, solo los módulos de servicio individuales o la

Auditoría completa. Se define los objetivos y se adapta la gama de servicios para cumplirlos.

Las ofertas de servicio únicas van desde el registro y análisis del estado de los compresores y las máquinas, el desarrollo de planes de acción y el mantenimiento profesional de los componentes neumáticos hasta el mantenimiento de un estado optimizado de la máquina (EACSA, 2017)

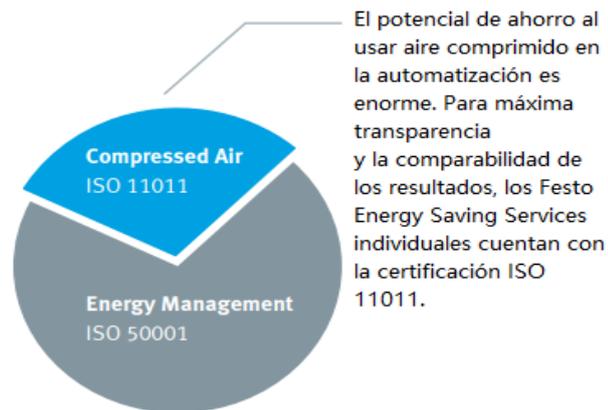


Figura 2. 10 Ahorro al usar aire comprimido  
Fuente. (Festo, 2021)

### 2.11.1 PreAuditoria de Festo

La PreAuditoria brinda importantes consejos y recomendaciones sobre lo que puede hacer para mejorar la eficiencia energética. Al final de la PreAuditoria, se recibirá un informe completo que contiene un análisis de la situación actual en todo su sistema de aire comprimido y una lista de recomendaciones ponderadas. Esto permitirá identificar de inmediato las áreas en las que un inicio rápido con medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética tendrá el mayor efecto. Véase la figura 2.11.



Figura 2. 11 Eficiencia Energética  
Fuente. (Festo, 2021)

## El proceso

En primer lugar, los expertos evalúan y analizan el sistema de generación y preparación de aire comprimido. El enfoque está en los posibles puntos débiles que se pueden optimizar. La determinación del consumo de aire comprimido, la medición de la caída de presión y el análisis de la calidad del aire comprimido proporcionan indicadores adicionales para posibles mejoras.

Posteriormente, viene la revisión rápida, durante la cual los expertos localizan fugas a modo de ejemplo y realizan un análisis de la máquina centrándose en la eficiencia energética. Todos estos pasos producen una imagen detallada del consumo de energía de su sistema de producción.

### 2.11.2 Módulos de servicio

#### 2.11.2.1 Análisis energético de la generación de aire comprimido

El seguimiento de la generación de aire comprimido durante varios días, incluidos los tiempos de inactividad y el fin de semana, produce un perfil de consumo claro (véase la figura 2.12). Documenta los requisitos de energía y aire comprimido, incluidas las fluctuaciones en el consumo desde la carga básica hasta la carga máxima en diferentes momentos de funcionamiento. A continuación, se describe el potencial de ahorro.

- Medición independiente del fabricante
- Medición durante el funcionamiento
- Consumo de energía transparente de todo el sistema
- Conocimiento de las reservas de salida del sistema.



Figura 2. 12 Análisis energético de la generación de aire comprimido  
Fuente. (Festo, 2021)

### 2.11.2.2 Análisis de la calidad del aire comprimido

El aceite, el agua o las partículas en el aire comprimido tienen un efecto negativo en la vida útil de los componentes neumáticos. Los costos de energía y operación aumentan y, en el peor de los casos, pueden provocar un tiempo de inactividad inesperado en la producción. La medición centralizada y descentralizada de la calidad del aire comprimido incluye la inspección de las unidades de servicio, la medición del contenido de agua y aceite, la temperatura y la presión del aire, así como la determinación del punto de rocío a presión (véase la figura 2.13). Algunos de los beneficios son:

- Garantía de una calidad óptima del aire comprimido.
- Mayor vida útil de los componentes neumáticos.
- Minimización de paradas de producción inesperadas.



Figura 2. 13 Análisis de la calidad del aire comprimido  
Fuente. (Festo, 2021)

### 2.11.2.3 Medición de caída de presión

La caída de presión en el sistema se puede registrar utilizando varios sensores de presión con registradores de datos instalados en diferentes lugares del sistema de aire comprimido. Al reducir la presión, se pueden lograr ahorros de energía de hasta un 8% para la generación de presión. Sus principales beneficios son:

- Costos más bajos a través de reducciones de presión.
- Fiabilidad del proceso, gracias al nivel de presión constante. La figura 2.14 muestra la medición de caída de presión.



Figura 2. 14 Medición de caída de presión  
Fuente. (Festo, 2021)

#### 2.11.2.4 Análisis de consumo de aire comprimido

Al medir con precisión el consumo de aire comprimido en las máquinas individuales en reposo y durante el funcionamiento, el equipo analiza varios parámetros, como el consumo por ciclo de la máquina, el consumo medio por minuto, la presión media, la presión máxima/mínima y el caudal de aire máximo/mínimo. Estos resultados de medición se documentan en un informe.

Algunos de los beneficios son:

- Determinación del consumo real de aire comprimido de máquinas individuales.
- No hay caída de presión no deseada debido a un suministro insuficiente.
- Sin consumo innecesario de energía por sobreoferta.
- Se determinan las pérdidas de aire comprimido debidas a fugas.
- El suministro de aire comprimido a la máquina se puede configurar de forma óptima.



Figura 2. 15 Análisis de consumo de aire comprimido  
Fuente. (Festo, 2021)

### 2.11.2.5 Detección y eliminación de fugas

La identificación sistemática de fugas en los sistemas de aire comprimido y su eliminación profesional reduce considerablemente los costos de aire comprimido, ya que los componentes de aire comprimido con fugas desperdician mucha energía y dinero. Por tanto, los especialistas revisan todo el sistema de aire comprimido, desde el compresor hasta la aplicación neumática. Sus principales beneficios son:

- No se requiere tiempo de inactividad de producción.
- Transparencia de las pérdidas de energía y dinero, así como de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Detección de fugas mediante detectores de ultrasonido.
- Evaluación y clasificación de las fugas individuales.



Figura 2. 16 Detección y eliminación de fugas  
Fuente. (Festo, 2021)

### 2.11.2.6 Análisis de máquinas para la eficiencia energética

Estabilice sus procesos y reduzca sus costos diseñando estratégicamente su sistema de aire comprimido para el futuro. Con base en el análisis, los expertos definen recomendaciones sobre cómo puede aprovechar el posible potencial de optimización de energía en aplicaciones de aire comprimido. Esto incluye una estimación de los costos y ahorros, así como el tiempo de amortización previsto. Los beneficios de ésta son:

- Revisión sistemática de la eficiencia energética del sistema neumático.
- Identificación rápida de medidas que sean económicamente sensatas y técnicamente viables.
- Documentación de las aplicaciones de aire comprimido analizadas.



Figura 2. 17 Análisis con experto de máquinas para la eficiencia energética  
Fuente. (Festo, 2021)

### **2.11.2.7 Mantenimiento**

Las nuevas fugas y el desgaste de los componentes nunca se pueden excluir por completo. Por lo tanto, para obtener beneficios a largo plazo de los ahorros de costos y energía logrados, se deben tomar medidas a intervalos regulares para mantener la condición óptima de las máquinas:

- Análisis periódico de la generación, consumo y calidad del aire comprimido.
- Detección y eliminación periódica de fugas.
- Análisis periódico de la generación de aire comprimido, consumo y calidad.
- Detección y eliminación periódica de fugas.

Los sistemas de monitoreo y diagnóstico de condición ayudan a detectar el desgaste y los cambios en las presiones y caudales de manera temprana. Esto facilita la planificación del mantenimiento y evita paradas de producción inminentes. Si aún se produce un tiempo de inactividad, la causa de la falla se puede identificar rápidamente. Algunos de los beneficios son:

- Todo el sistema de aire comprimido está siempre en buenas condiciones.
- Ahorros a largo plazo en energía y costos.
- Alta disponibilidad del sistema y prevención de tiempos de inactividad no planificados.
- Calidad de producción constante.

## CAPÍTULO 3: AUDITORÍA ENERGÉTICA A COMPRESORES

### 3.1 Datos técnicos de los compresores

La auditoría energética se realiza con el fin de recortar costos y ser más competitivos. El uso eficiente de la energía es un aspecto muy importante en las fábricas o empresas, en donde deben involucrarse gerentes financieros, gerentes de producción y mantenimiento. Asimismo, para mantener la competitividad y proteger el medio ambiente es necesario controlar el consumo de energía.

El mejoramiento de la eficiencia energética en estos sistemas puede permitir la reducción del 20% al 50% del consumo de electricidad en los compresores, lo que significa miles o cientos de miles de dólares de ahorros potenciales anuales. Un sistema de aire comprimido bien operado ahorra energía, disminuye las interrupciones productivas, reduce el costo de mantenimiento, incrementa la productividad y mejora la calidad. A continuación, en las siguientes tablas (3.1 al 3.7) se muestra los datos de los compresores.

Tabla 3. 1 Datos de placa del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP

Marca	<b>Ingersoll Rand</b>
Potencia del motor	50HP/37,28kW
Voltaje de Alimentación	440 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.97
Presión de trabajo	7 bar (100 psi).
Caudal Teórico	215 CFM (6,1 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 2 Datos de placa del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP

Marca	<b>Ingersoll Rand</b>
Potencia del motor	30HP/22,37kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.83
Presión de trabajo	125 PSI (8.62 Bar)
Caudal Teórico	117 CFM (3,31 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 3 Datos de placa del compresor N° 3 Atlas Copco 50HP

Marca	<b>ATLAS COPCO GA37</b>
Potencia del motor	50HP/37,28kW
Voltaje de Alimentación	460 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.83
Presión de trabajo	125 PSI (8.62 Bar)
Caudal Teórico	216 CFM (6,11 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 4 Datos de placa del compresor N° 4 Ingersoll Rand 30HP

Marca	<b>INGERSOLL RAND</b>
Potencia del motor	30HP / 22,37kW
Voltaje de Alimentación	440 VAC
Frecuencia	60 Hz
Cos $\Theta$	0.97
Presión de trabajo	7 bar (100 psi)
Caudal Teórico	117 CFM (3,31 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 5 Datos de placa del Secador N° 5 Ingersoll Rand

Marca	<b>INGERSOLL RAND</b>
Modelo	NVC1000A 40N
Serial N°	545489
Presión de trabajo	15 bar (220 psi)
Caudal Teórico	1000 SCFM (28,3 m <sup>3</sup> /min)

Fuente. El autor

Tabla 3. 6 Datos del Tanque Pulmón

Capacidad de acumulación	3700 litros
--------------------------	-------------

Fuente. El autor

Tabla 3. 7 Datos Adicionales

Red de distribución aire comprimido	Abierta
Diámetro de tubería principal	2"
Diámetro de la tubería secundaria	1" y ½"

Fuente. El autor

### 3.2 Metodología de medición

Para adquirir las diferentes mediciones con este programa se coloca un sensor de presión en el tanque pulmón y una pinza amperimétrica en una de las fases a la entrada de la alimentación de voltaje del compresor, así el consumo de aire comprimido del compresor es documentado y evaluado.

Se obtiene un gráfico del consumo del aire comprimido por día, mientras el compresor está trabajando.

El cuadro de consumo energético muestra:

- El funcionamiento del compresor con el respectivo consumo energético.
- El costo del gasto de la energía del trabajo del compresor en carga, vacío y total.
- La medición del costo de la energía por metro cubico.
- También valora los costos de generación de aire comprimido.

#### 3.2.1 Registro de datos utilizando un equipo PDA

Se registra en la estación de aire comprimido los siguientes datos:

- El número de compresores a ser auditados.
- Caudal de cada equipo en m<sup>3</sup>/min.
- Presión neta de trabajo y presiones seteadas.
- Voltaje de alimentación.
- Los sensores conectados a la lista de datos junto con el rango de medida de amperios.

#### 3.2.2 Procedimiento para el registro de datos a través del PDA

El equipo de medición Data Logger Boge (Agenda Electrónica), es la que registra los datos de medición en todo el tiempo de la auditoria energética. Véase la figura 3.1.



Figura 3. 1 Caja de medición con Data Logger BOGE  
Fuente. El autor

### 3.2.3 Procedimiento para realizar la medición del compresor

La medición se realiza poniendo una pinza amperimétrica de 200A en una de las fases del motor principal en el compresor, ésta a su vez se conecta al convertidor de corriente de 4-20 mA con una sensibilidad de 1mA/A. Por tanto, este debe conectarse a las entradas analógicas de la caja de medición. Véase la figura 3.2.

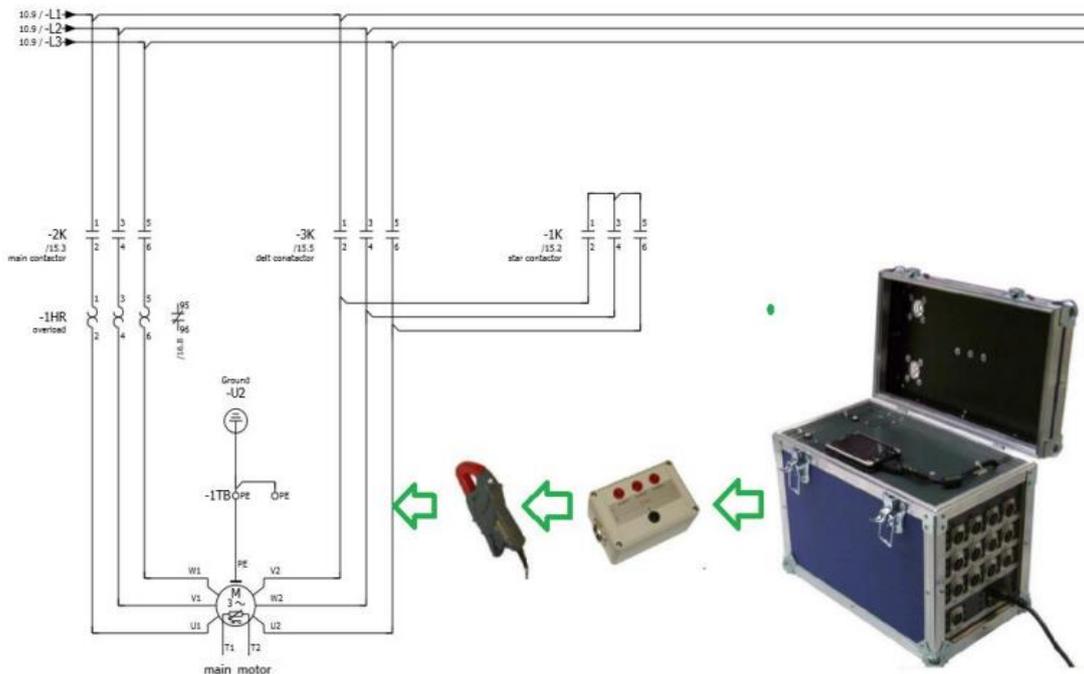


Figura 3. 2 Procedimiento para realizar la medición de un compresor  
Fuente. El autor

La auditoría establece registrar los siguientes puntos:

1. Consumo total de aire comprimido en m<sup>3</sup>/min de la planta.
2. Presión de trabajo máxima y mínima en bares.
3. Diagramas de consumo de aire comprimido en m<sup>3</sup>/min por día de trabajo.

4. Porcentajes de operación del compresor total en horas.
5. Porcentajes de operación del compresor en carga durante el tiempo
6. Auditado.
7. Porcentajes de operación del compresor en vacío durante el tiempo
8. auditado.
9. Consumo energético en Kwh en el tiempo de carga del compresor.
10. Consumo energético en Kwh en el tiempo de vacío del compresor.
11. Número de ciclos de trabajo durante el tiempo auditados.
12. Número de encendidos del motor principal del equipo.
13. Promedio de generación de aire comprimido en m<sup>3</sup> al año.
14. Costo energético total al generar aire comprimido.

No obstante, para el análisis se toma en cuenta 24 horas de trabajo del compresor en el día(s) de mayor consumo de aire comprimido.

El cumplimiento de la ISO 11011 debe determinar la medición cuantitativa y cálculo energético de las fugas. Así también cálculo, evaluación y creación de los indicadores de mejora (KPI) para futuros ahorros energéticos del sistema.

Finalmente, informe resultados y recomendación de optimizaciones con la presentación de gráficos, comparativas e indicadores de mejora (KPI).

En el diagrama de la figura 3.3, se analiza de cómo debe funcionar el compresor en carga y vacío, se debe tener en cuenta que los tiempos de ciclo del compresor afectan en gran medida la eficiencia de su sistema de aire comprimido.

El tiempo de ciclo es la cantidad de tiempo que le toma al compresor cargar y descargar al tiempo que satisface sus necesidades de aire comprimido. Cuanto más rápido cicla el compresor, más energía consume para una salida de aire comprimido dada. Por lo tanto será más eficaz que el compresor pase la mayor parte del tiempo en carga, y el menor tiempo en vacío debido a que las pérdidas energéticas son establecidas en el período de descarga.

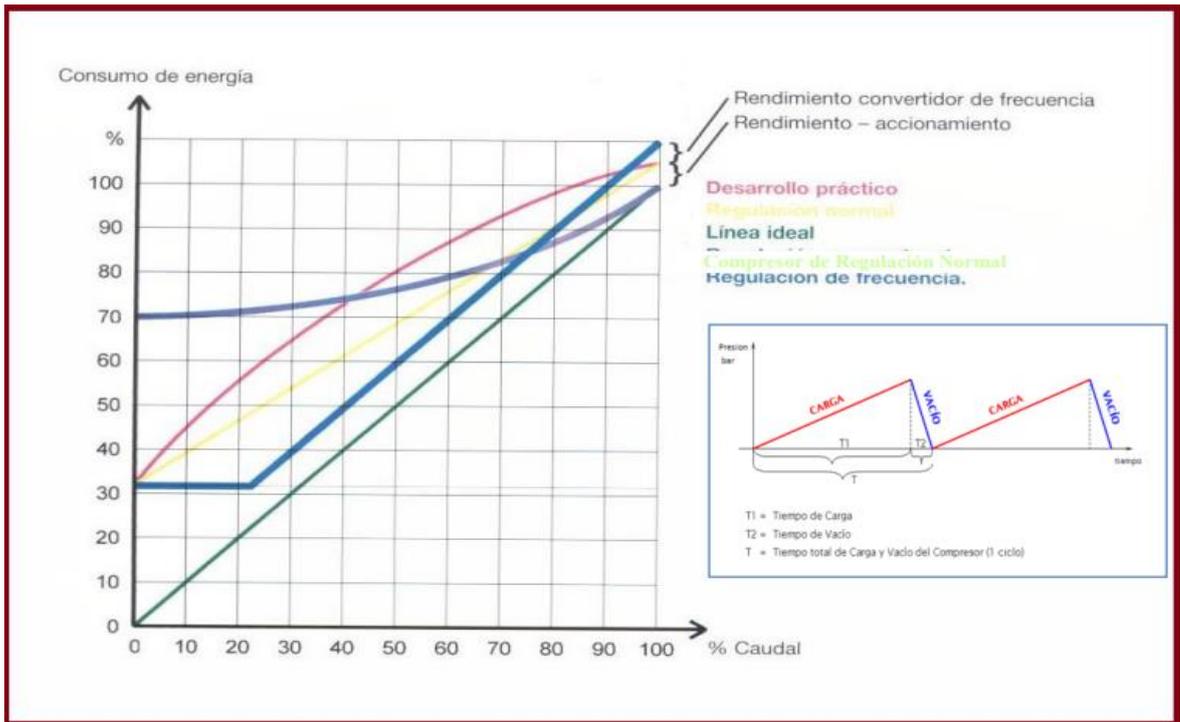


Figura 3. 3 Diagrama de presión

Fuente. El autor

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE DATOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA

En base a la metodología para la adquisición de datos por consumo del aire presurizado en la planta (subcapítulo 3.2), se analiza resultados de caudal entregado por compresores en día (s) de menor consumo, También día (s) de mayor consumo dentro de una semana.

### 4.1 Día de menor consumo

En la figura 4.1 se observa que el menor consumo de aire de la planta es de 3,30 m<sup>3</sup>/min desde las 00:00 hasta las 20:00. La unidad de medida de m<sup>3</sup>/min es el caudal o movimiento (flujo) del aire comprimido en su salida. En este día se incrementa el consumo a 6,6 m<sup>3</sup>/min entre las 20:00 con un pico de 6,60 m<sup>3</sup>/min.

Por lo tanto, el compresor Ingersoll Rand 50 Hp permanece en vacío.

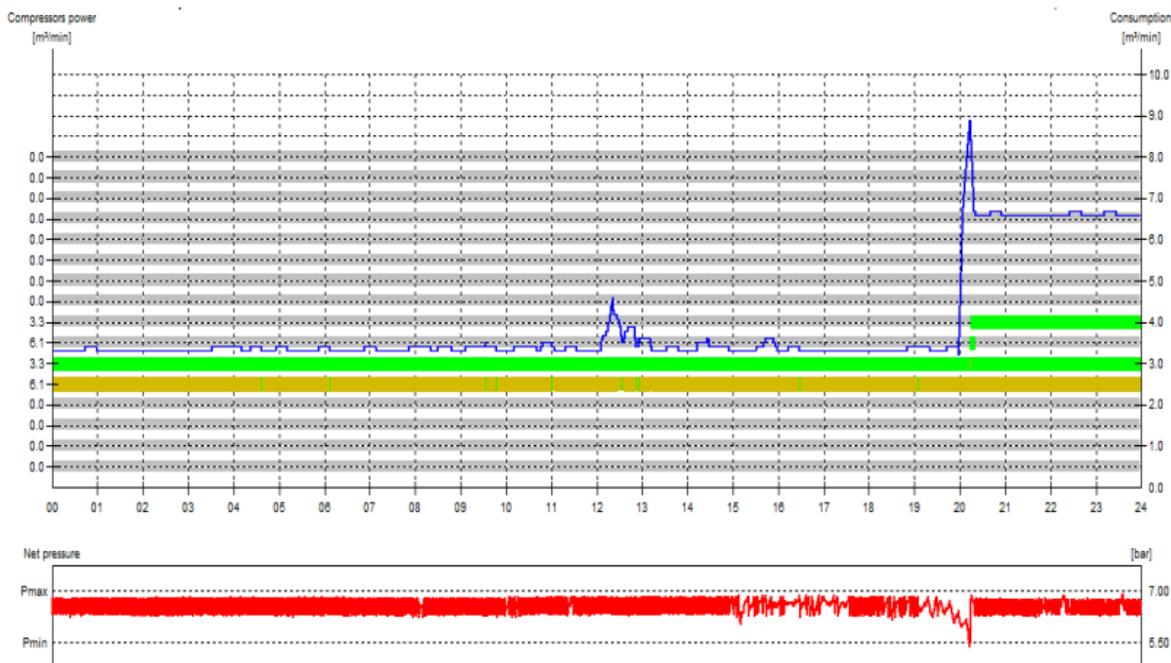


Figura 4. 1 Diagrama de caudal dado por compresor 1 vs. tiempo

Fuente: El autor

En cambio, en la figura 4.2 muestra que la presión de la red oscila entre una presión mínima de 5.52 bars (80 psi) y una presión máxima de 6.91 bars (100 psi); igualmente, se observa muchas oscilaciones de carga y descarga (vacío). Se indica que el caudal y la presión son proporcionales, esto representa que a medida

que aumenta la presión, el caudal de aire entregado por el compresor disminuye; y viceversa.

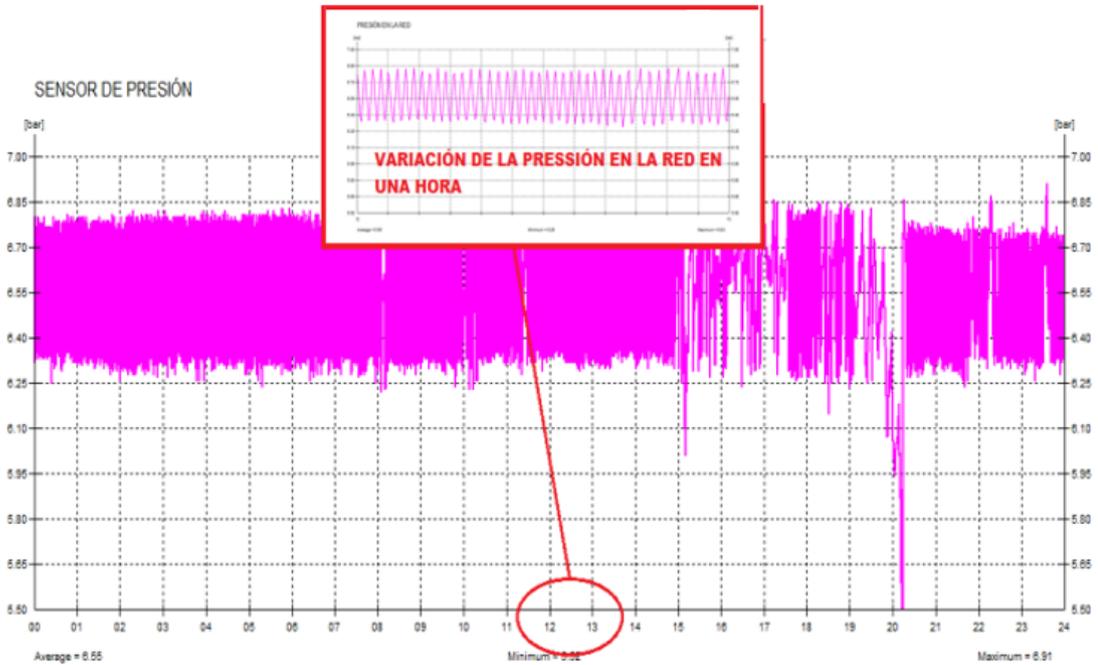


Figura 4. 2 Variación de presión en la red  
Fuente. El autor

En la tabla 4.1 se puede ver la evidencia del comportamiento de trabajo de los compresores.

Tabla 4. 1 Comportamiento de los compresores

Compressor Data (Measurement Mo, 21.12.2015)												
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]	[%]
5	INGERSOLL RAND 50HP		6.1		28.18	11.46	23:59:40	100.00	00:12:40	0.88	23:47:00	99.12
6	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		26.96	16.20	23:59:40	100.00	23:59:00	99.95	00:00:40	0.05
7	ATLAS COPCO 50HP		6.1		42.99	0.00	23:59:40	0.39	00:05:40	100.00	00:00:00	0.00
8	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		27.31	14.40	23:59:40	15.70	03:45:50	99.93	00:00:10	0.07

Measured Data (Measurement Mo, 21.12.2015)										
CH	Compressor	Motor	Load	Total Power [kWh]			Total Air	Costs [\$]		
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Total	m <sup>3</sup>	Loaded	Unloaded	Total
5	INGERSOLL RAND 50HP	1	55	5.95	272.58	278.53	77.0	0.54	24.53	25.07
6	INGERSOLL RAND 30HP	1	2	646.57	0.18	646.75	4,749.0	58.19	0.02	58.21
7	ATLAS COPCO 50HP	1	1	4.06	0.00	4.06	35.0	0.37	0.00	0.37
8	INGERSOLL RAND 30HP	1	1	102.79	0.04	102.83	745.0	9.25	0.00	9.25

Fuente. El autor

## 4.2 Análisis de la potencia de compresores

La potencia en este caso es la capacidad de trabajo que tiene el compresor y se mide en HP (Horse Power, caballos de fuerza) o en KW (Kilowatios). 1 HP es equivalente a 0,74 KW.

Además, se debe tener en cuenta que los tiempos de ciclo del compresor afectan en gran medida la eficiencia de su sistema de aire comprimido. El tiempo de ciclo es la cantidad de tiempo que le toma al compresor cargar y descargar al tiempo que satisface sus necesidades de aire comprimido. Cuanto más rápido cicla el compresor, más energía consume para una salida de aire comprimido dada.

A continuación, en las figuras 4.3 y 4.4 se pueden apreciar los trabajos de los compresores N°1 Ingersoll Rand 50HP y N°2 Ingersoll Rand 30HP.

### Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó 00:12:40 (hh:mm:ss), es decir, el 0.88% en carga. Pues, permaneció en vacío 23:47:00 que corresponde al 99.12%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 55 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 5.95 KWh (trabajo), debiendo pagar 0.54 dólares. En vacío, el consumo de energía es 272.58 KWh (pérdida) debiendo pagar 24.53 dólares, el monto total a pagar es de 25.07 dólares por este día.

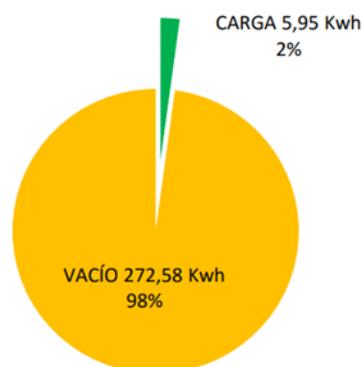


Figura 4. 3 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50 Hp  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó en carga 23:59:40, es decir, el 100%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 2 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 646.57 KWh (trabajo), debiendo pagar 58.19 dólares. En vacío, el consumo de energía es 0,18 KWh debiendo pagar 0,02 dólares, el monto total a pagar es de 58,21 dólares por este día.

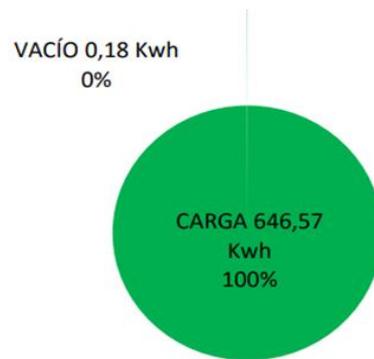


Figura 4. 4 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30 Hp  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°3 Atlas Copco GA37 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó 00:05:40 (hh:mm:ss) es decir, el 0.39% en carga. Por tanto, permaneció apagado 23:20:00, el cual corresponde al 99.61%
- ❖ El compresor en estos cinco minutos de trabajo tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo cual, el consumo de energía en carga es 4.06 KWh (trabajo), debiendo pagar 0.37 dólares.

### Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó en carga 03:45:50, es decir, el 99.93%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 1 ciclos (carga-vacío) por lo cual, el consumo de energía en carga es 102.79 KWh (trabajo), debiendo pagar 9.25 \$. En vacío, el consumo de energía es 0,04 KWh debiendo pagar 0,00 \$. Sin embargo, el monto total a pagar es de 9,25\$ por este día.

En la figura 4.5 se puede ver las áreas del consumo energético en carga (color verde) y descarga o vacío (color marrón); predominando en este caso el color marrón.

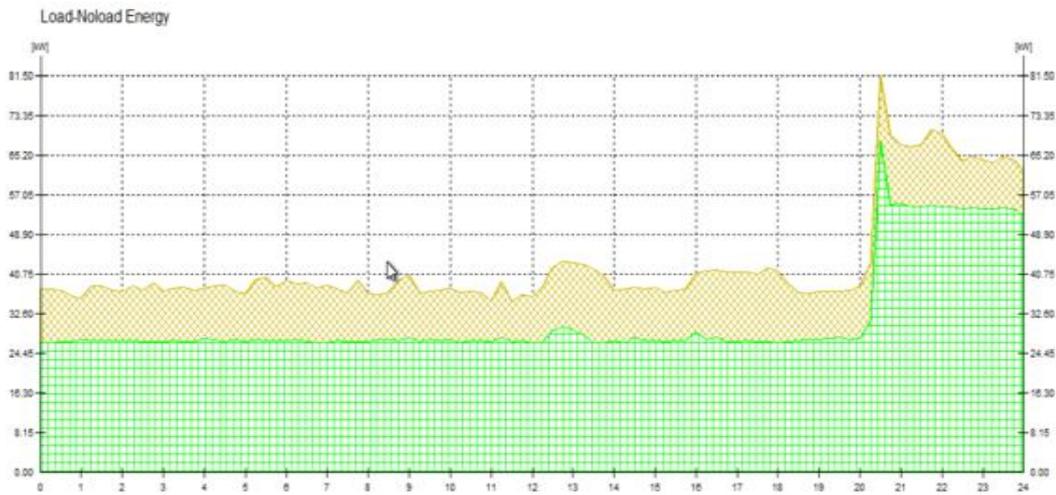


Figura 4. 5 Consumo energético en carga-descarga vs. tiempo.  
Fuente. El autor

Mientras que en la tabla 4.2 muestra el resumen de los datos antes mencionados de la tabla 4.1; adicional a esto es importante indicar que el sistema está utilizando el 47.3 % de su capacidad de generación.

Tabla 4. 2 Resumen del comportamiento de los compresores

Measured Data (Measurement No. 21.12.2015)				
Audit Time	23.59:40 [hh:mm:ss]			
Compressed Air Consumption	5,600 [m³]			
	Loaded	Unloaded	Total	
Energy Consumption	759	273	1,032 [kWh]	
Load / Unload Run	73.5	26.5	100.0 [%]	
Key Performance Indicator	0.1354	-	0.1641 [kWh/m³]	
	Average	Minimum	Maximum	
Compressed Air Consumption	3.9	3.2	8.9 [m³/min]	
Power Consumption	24.9	20.3	56.5 [kW]	
Net Pressure	6.6	5.5	6.9 [bar]	
System Utilisation	20.8	17.0	47.3 [%]	
Compressed Air Costs				
Compressed Air Consumption Per Annum	2,046,664 [m³/a]			
	Loaded	Unloaded	Total	
Energy Costs Measuring Period	66.-	25.-	93.- [\$]	
Energy Costs Per Annum	24,826.-	9,127.-	33,953.- [\$]	
Energy Costs Per m³	0.0166 [\$/m³]			

Fuente. El autor

#### 4.2.1 Días de mayor consumo

En la figura 4.6 se observa que el mayor consumo de aire en la planta es de 6,8 m<sup>3</sup>/min desde las 00:00 hasta las 20:00, con dos picos altos de consumo; el primero de 9,3 m<sup>3</sup>/min a las 07:30 y el segundo pico de 8,5 m<sup>3</sup>/min a las 15:00. En este día hay un tiempo de 4 horas que cae el consumo a 3,2 m<sup>3</sup>/min. El compresor Ingersoll Rand 50 Hp permanece en vacío.

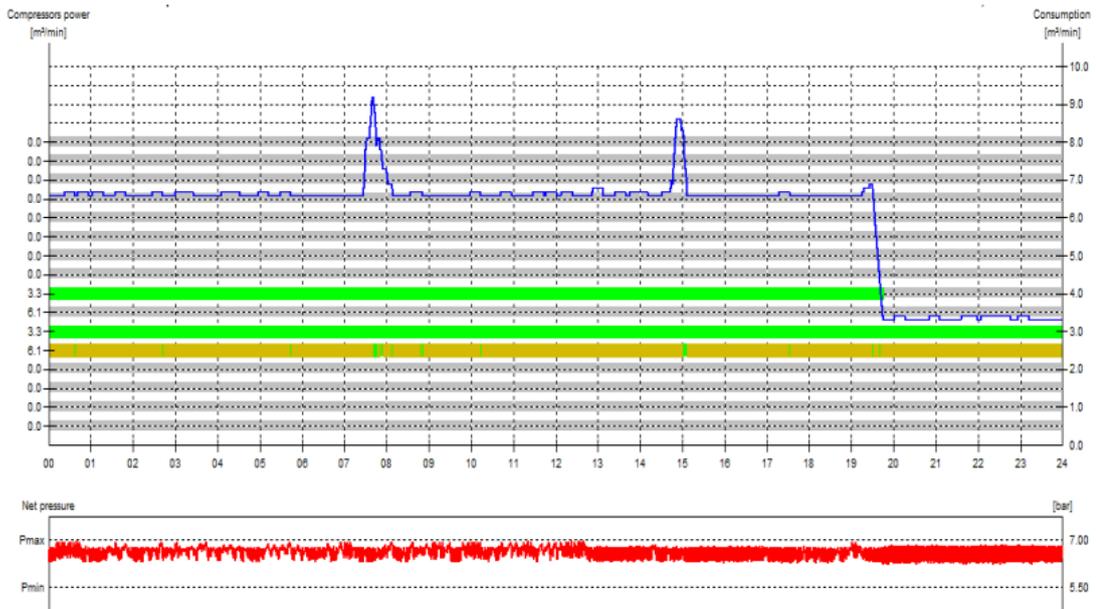


Figura 4. 6 Mayor consumo de aire en la planta  
Fuente. El autor

En la figura 4.7 muestra que la presión de la red oscila entre una presión mínima de 6,23 bars (90,35 psi) y una presión máxima de 6,96 bars (101 psi), se observa oscilaciones de carga y descarga (vacío).

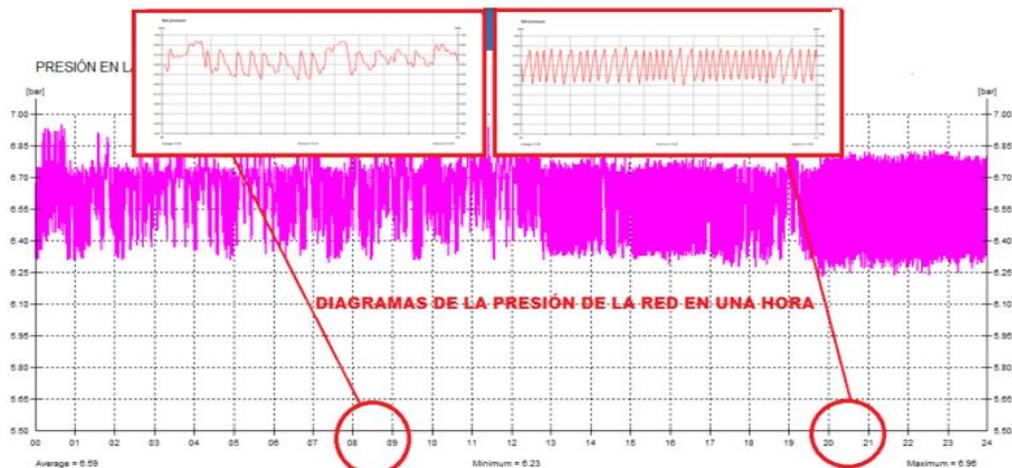


Figura 4. 7 Diagrama de presión en la red en una hora  
Fuente. El autor

En la tabla 4.3 muestra la evidencia del comportamiento de trabajo de los compresores, lo cual se detalla a continuación.

Tabla 4. 3 Comportamiento de los compresores

Compressor Data (Measurement Su, 20.12.2015)													
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]	[%]	
5	INGERSOLL RAND 50HP		6.1		28.86	11.32	23:59:40	100.00	00:19:40	1.37	23:40:00	98.63	
6	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		27.03	0.00	23:59:40	100.00	23:59:40	100.00	00:00:00	0.00	
7	ATLAS COPCO 50HP		6.1		37.30	0.00	23:59:40	0.00	00:00:00	0.00	00:00:00	0.00	
8	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		26.98	0.00	23:59:40	82.33	19:45:20	100.00	00:00:00	0.00	

Measured Data (Measurement Su, 20.12.2015)										
CH	Compressor	Motor	Load	Total Power [kWh]			Total Air	Costs [\$]		
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Total	m³	Loaded	Unloaded	Total
5	INGERSOLL RAND 50HP	1	55	9.46	268.02	277.48	120.0	0.85	24.12	24.97
6	INGERSOLL RAND 30HP	1	1	648.54	0.00	648.54	4,751.0	58.37	0.00	58.37
7	ATLAS COPCO 50HP	0	0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
8	INGERSOLL RAND 30HP	1	1	533.09	0.00	533.09	3,912.0	47.98	0.00	47.98

Fuente. El autor

Posteriormente, en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se pueden ver los trabajos realizados de los compresores N°1 Ingersoll Rand 50HP; N°2 Ingersoll Rand 30HP y N°4 Ingersoll Rand 30HP.

### Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó 00:19:40 (hh:mm:ss), es decir, el 1.37% en carga. De la misma manera, permaneció en vacío 23:40:00, el cual corresponde al 98.63%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 55 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es de 9.46 KWh (trabajo) debiendo pagar 0.85 dólares. En vacío el consumo de energía es 268.02 KWh (pérdida,) debiendo pagar 24.12 dólares. Entonces, el monto total a pagar es de 24,97 dólares por este día.

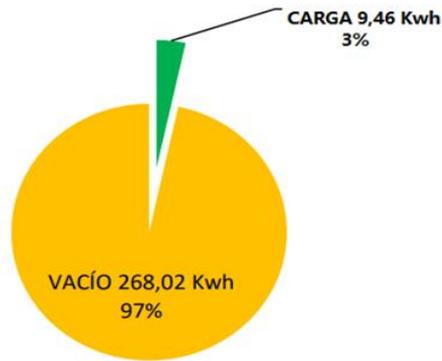


Figura 4. 8 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor trabajó en carga 23:59:40, es decir, el 100%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 1 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 648.54 KWh (trabajo) debiendo pagar 58.37 dólares. En vacío el consumo de energía es 0,00 KWh por este día.

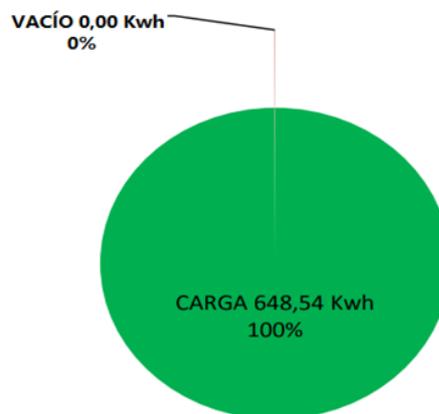


Figura 4. 9 Trabajo de compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°3 Atlas Copco GA37 50HP

- De las 24 horas del día, el compresor permaneció apagado.

### Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP

- De las 24 horas del día, el compresor trabajó en carga 19:45:20, es decir, el 100%.

- El compresor en este día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es de 533.09 KWh (trabajo) debiendo pagar 47,98 dólares. En vacío el consumo de energía es 0,00 KWh por este día.

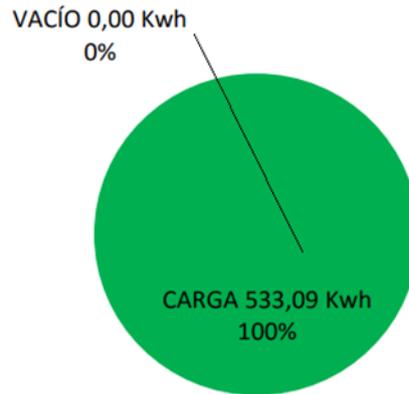


Figura 4. 10 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

A continuación, en la figura 4.11 se puede apreciar las áreas del consumo energético en carga (color verde) y descarga o vacío (color marrón); predominando en este caso, el color marrón.

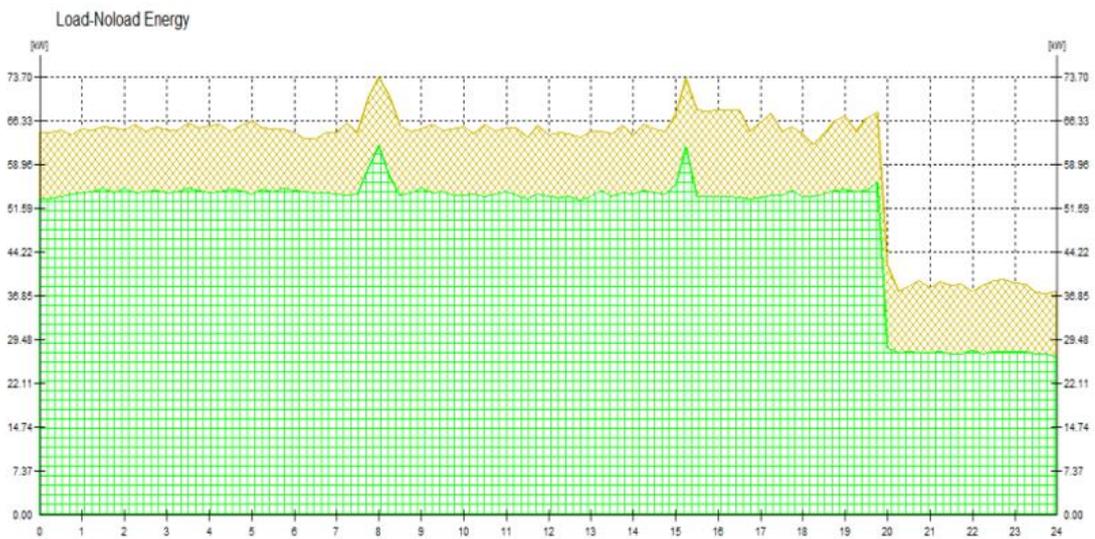


Figura 4. 11 Consumo Energético en Carga-Descarga Vs. Tiempo  
Fuente. El autor

La tabla 4.4 muestra el resumen de los datos, antes mencionados de la tabla 4.3. Además, es importante mencionar que el sistema está utilizando el 48.9% de su capacidad de generación.

Tabla 4. 4 Resumen del comportamiento de los compresores

Measured Data (Measurement Su, 20.12.2015)			
Audit Time	23:59:40 [hh:mm:ss]		
Compressed Air Consumption	8,783 [m³]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	1,191	268	1,459 [kWh]
Load / Unload Run	81.6	18.4	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1356	-	0.1661 [kWh/m³]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	6.1	3.3	9.2 [m³/min]
Power Consumption	38.7	21.0	58.4 [kW]
Net Pressure	6.6	6.2	7.0 [bar]
System Utilisation	32.4	17.5	48.9 [%]
Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	3,206,537 [m³/a]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	107.-	24.-	131.- [\$]
Energy Costs Per Annum	39,064.-	8,762.-	47,826.- [\$]
Energy Costs Per m³	0.0149 [\$/m³]		

Fuente. El autor

En la figura 4.12 se observa que el mayor consumo de aire de la planta es de 6,6 m³/min., desde las 00:00 hasta las 14:00 y de 16:15 hasta las 24:00. Por tanto, en este día hay un tiempo de 2 horas que cae el consumo a 3,2 m³/min. El compresor Ingersoll Rand 50 Hp permanece en vacío.

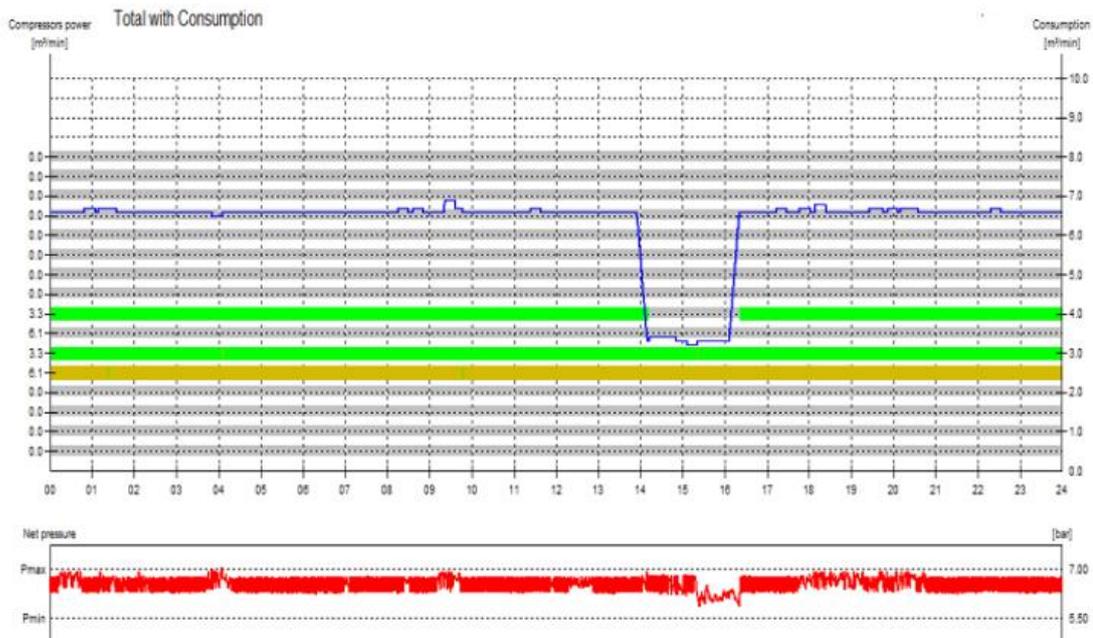


Figura 4. 12 Diagrama de Caudal Vs. Tiempo  
Fuente. El autor

En la figura 4.13 muestra que la presión de la red oscila entre una presión mínima de 5.86 bar (84.9 psi) y una presión máxima de 6.99 bar (100 psi). Además, se observa oscilaciones de carga y descarga (vacío).

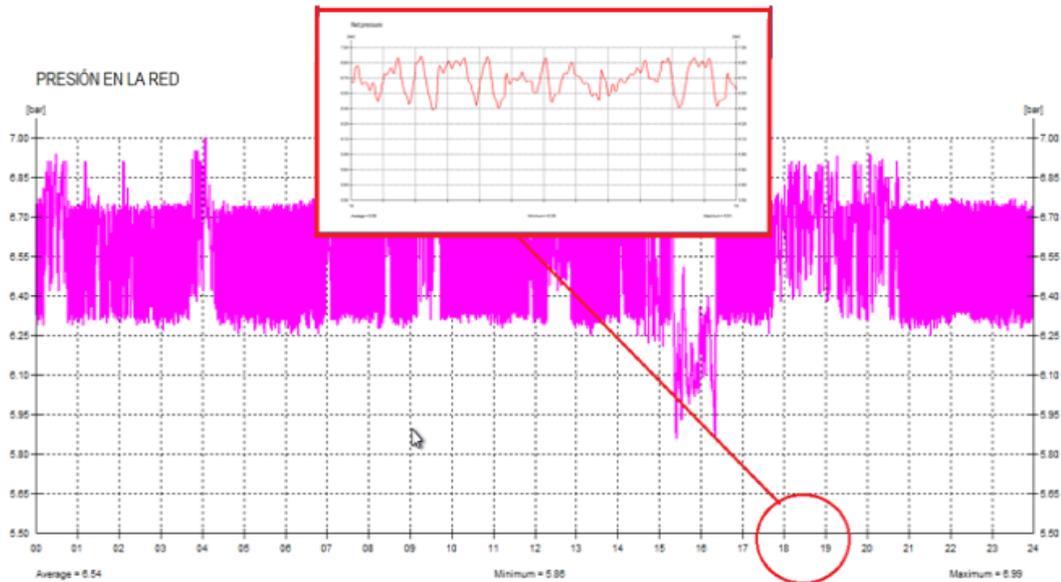


Figura 4. 13 Diagrama de presión en la red  
Fuente. El autor

En la tabla 4.5 muestra los detalles y la evidencia del comportamiento del trabajo de los compresores.

Tabla 4. 5 Comportamiento de los compresores

Compressor Data (Measurement Tu, 22.12.2015)												
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]	[%]
5	INGERSOLL RAND 50HP		6.1		28.25	11.66	23:59:40	100.00	00:04:20	0.30	23:55:20	99.70
6	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		26.86	14.40	23:59:40	100.00	23:58:30	99.92	00:01:10	0.08
7	ATLAS COPCO 50HP		6.1		37.30	0.00	23:59:40	0.00	00:00:00	0.00	00:00:00	0.00
8	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		26.90	7.20	23:59:40	90.90	21:48:20	99.97	00:00:20	0.03

Measured Data (Measurement Tu, 22.12.2015)										
CH	Compressor	Motor	Load	Total Power [kWh]			Total Air	Costs [\$]		
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Total	m <sup>3</sup>	Loaded	Unloaded	Total
5	INGERSOLL RAND 50HP	1	20	2.04	278.82	280.86	26.0	0.18	25.09	25.27
6	INGERSOLL RAND 30HP	1	3	643.96	0.28	644.24	4,747.0	57.96	0.03	57.99
7	ATLAS COPCO 50HP	0	0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
8	INGERSOLL RAND 30HP	2	2	586.59	0.04	586.63	4,318.0	52.79	0.00	52.79

Fuente. El autor

#### 4.2.2 Segundo día con alto consumo

Seguidamente, en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se pueden ver los trabajos realizados de los compresores N°1 Ingersoll Rand 50HP, N°2 Ingersoll Rand 30HP y N°4 Ingersoll Rand 30HP.

##### Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando 00:04:20 (hh:mm:ss), es decir, el 0.30% en carga. Es más, permaneció en vacío 23:55:20, el cual corresponde al 99.70%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 20 ciclos (carga-vacío), por lo que el consumo de energía en carga es de 2.04 KWh (trabajo) debiendo pagar 0.18 dólares.

Sin embargo, en vacío el consumo de energía es 278.82 KWh (pérdida) debiendo pagar 25.09 dólares; pues, el monto total a pagar es de 25.27 dólares por este día.

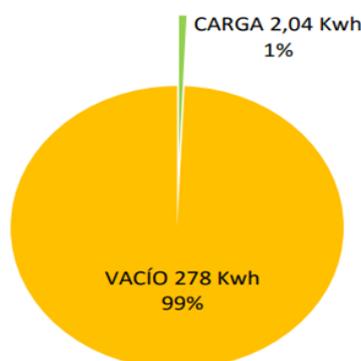


Figura 4. 14 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP  
Fuente. El autor

##### Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando en carga 23:58:30, es decir, el 100%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 3 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es de 643.96 KWh (trabajo), debiendo pagar 57.96 dólares. Por tanto, en vacío el consumo de energía es de 0,28 KWh debiendo pagar 0,03 dólares; entonces el monto total a pagar es de 57,99 dólares por este día.

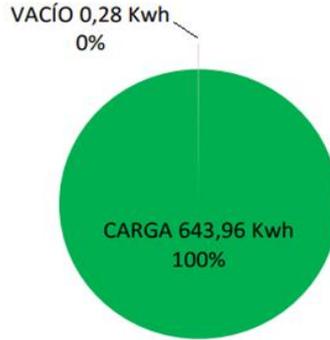


Figura 4. 15 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°3 Atlas Copco GA37 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor permaneció totalmente apagada.

### Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando en carga 21:48:20, es decir, el 99.97%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 2 arranque y 2 ciclos (carga-vacío), por lo que el consumo de energía en carga es 586.59 KWh (trabajo) debiendo pagar 52.79 dólares. En cambio, en vacío el consumo de energía es 0,04 KWh, debiendo pagar 0,00 dólares por este día.

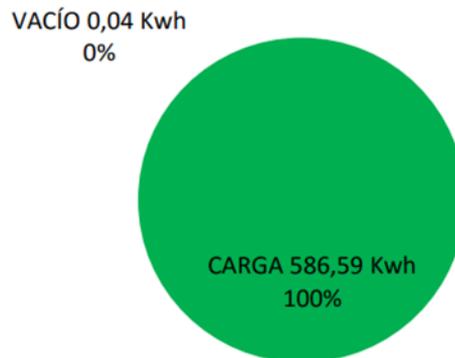


Figura 4. 16 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

En la figura 4.17 se puede visualizar las áreas del consumo energético en carga (color verde) y descarga o vacío (color marrón); predominando en este caso, el color marrón.

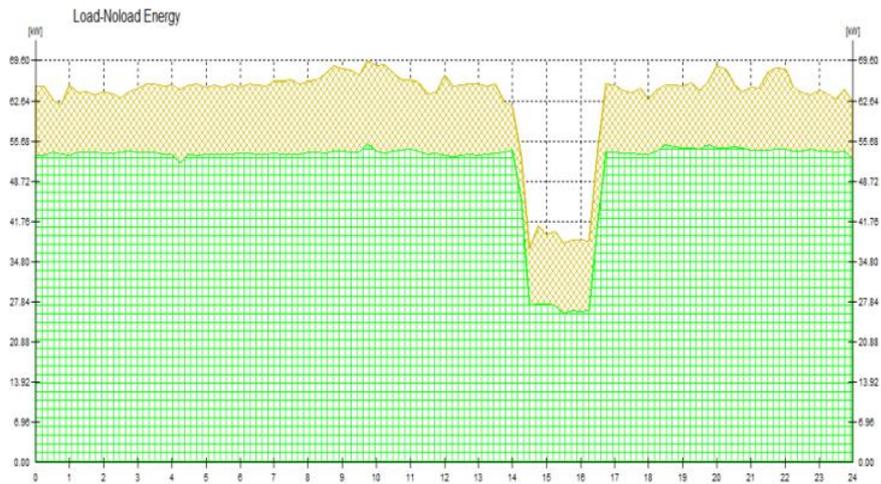


Figura 4. 17 Consumo energético en carga-descarga vs. tiempo.  
Fuente. El autor

No obstante, en la tabla 4.6 muestra el resumen de los datos antes mencionados en la tabla 4.5. Al mismo tiempo, es importante indicar que el sistema está utilizando el 36,7% de su capacidad de generación.

Tabla 4. 6 Resumen del comportamiento de los compresores

Measured Data (Measurement Tu, 22.12.2015)			
Audit Time	23:59:40 [hh:mm:ss]		
Compressed Air Consumption	9,091 [m³]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	1,233	279	1,512 [kWh]
Load / Unload Run	81.5	18.5	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1356	-	0.1663 [kWh/m³]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	6.3	3.2	6.9 [m³/min]
Power Consumption	40.1	20.3	43.8 [kW]
Net Pressure	6.5	5.9	7.0 [bar]
System Utilisation	33.6	17.0	36.7 [%]
Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	3,318.983 [m³/a]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	111.-	25.-	136.- [\$]
Energy Costs Per Annum	40,524.-	9,127.-	49,651.- [\$]
Energy Costs Per m³	0.0150 [\$/m³]		

Fuente. El autor

En la figura 4.18 se observa que el mayor consumo de aire de la planta es de 6,75 m³/min en todo el día con un pico a las 10:00 con un consumo de 8 m³/min. Por tanto, el compresor Ingersoll Rand 50 Hp permanece en vacío.

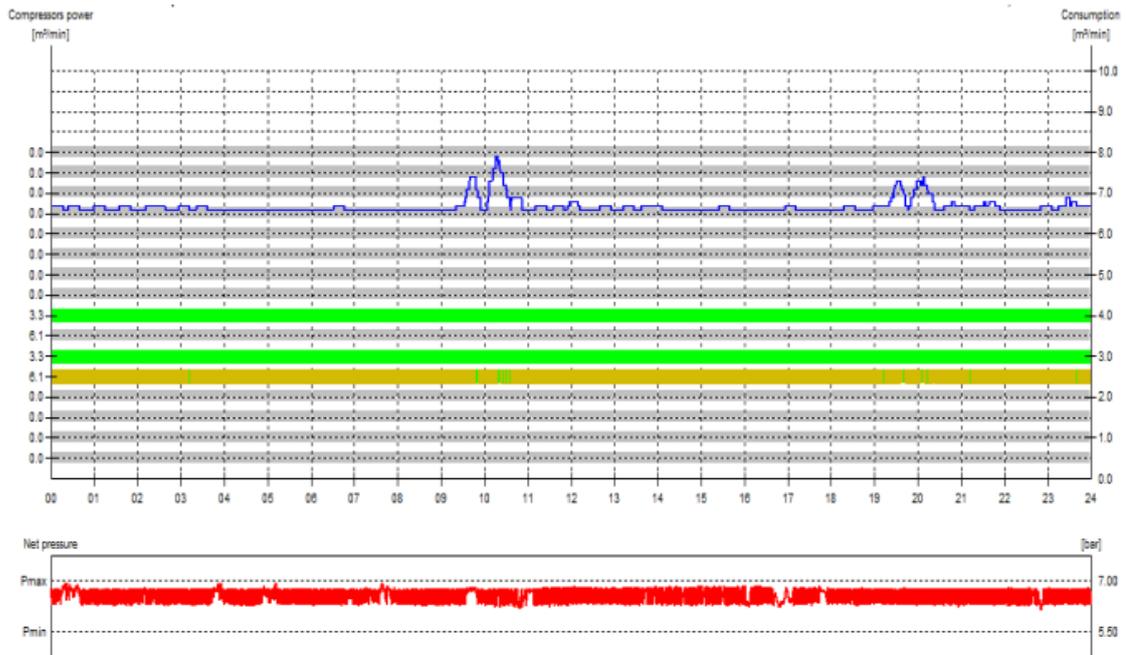


Figura 4. 18 Diagrama de caudal vs. tiempo  
Fuente. El autor

En la figura 4.19 muestra que la presión de la red oscila entre una presión mínima de 5.86 bar (84.9 psi) y una presión máxima de 7.03 bar (102 psi); como así también se observa oscilaciones de carga y descarga (vacío).

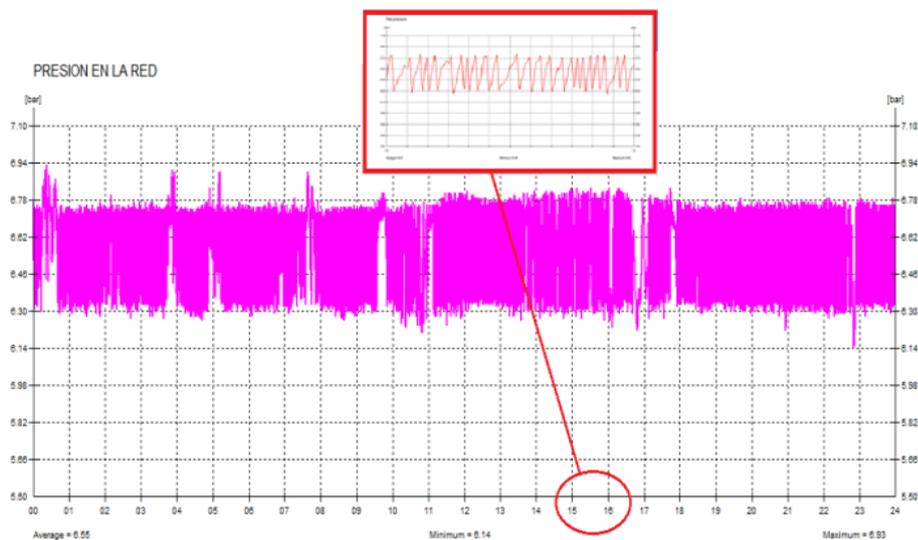


Figura 4. 19 Presión en la red  
Fuente. El autor

Luego, en la tabla 4.7 se ve la evidencia del comportamiento de trabajo de los compresores.

Tabla 4. 7 Comportamiento de los compresores

Compressor Data (Measurement We, 30.12.2015)												
CH	Compressor	Output [m <sup>3</sup> /min]		[W] Loaded		No-load	Audit Time	Time Run	Loaded		Unloaded	
		min	max	min	max	[W]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]	[hh:mm:ss]	[%]
5	INGERSOLL RAND 50HP		6.1		29.17	10.25	23:59:40	100.00	00:18:00	1.25	23:41:40	98.75
6	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		27.12	0.00	23:59:40	100.00	23:59:40	100.00	00:00:00	0.00
7	ATLAS COPCO 50HP		6.1		37.30	0.00	23:59:40	0.00	00:00:00	0.00	00:00:00	0.00
8	INGERSOLL RAND 30HP		3.3		27.28	0.00	23:59:40	100.00	23:59:40	100.00	00:00:00	0.00

Measured Data (Measurement We, 30.12.2015)												
CH	Compressor	Motor	Load	Total Power [kWh]			Total Air	Costs [\$]				
		Starts	Cycles	Loaded	Unloaded	Total	m <sup>3</sup>	Loaded	Unloaded	Total		
4	Compressor 4	0	0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00		
5	INGERSOLL RAND 50HP	1	61	8.75	242.82	251.57	110.0	0.79	21.85	22.64		
6	INGERSOLL RAND 30HP	1	1	650.88	0.00	650.88	4,751.0	58.98	0.00	58.98		
7	ATLAS COPCO 50HP	0	0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00		
8	INGERSOLL RAND 30HP	1	1	654.65	0.00	654.65	4,751.0	58.92	0.00	58.92		

Fuente. El autor

### 4.2.3 Tercer día con alto consumo

En las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se pueden observar los trabajos de los compresores N°1 Ingersoll Rand 50HP; N°2 Ingersoll Rand 30HP y N°4 Ingersoll Rand 30HP.

#### Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando 00:18:00 (hh:mm:ss) es decir el 1.25% en carga. Además, permaneció en vacío 23:41:40 que corresponde al 98.75%
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 61 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 8.75 KWh (trabajo) debiendo pagar 0.79 dólares.

En vacío el consumo de energía es 242.82 KWh (pérdida), debiendo pagar 21.85 dólares; pues, el monto total a pagar es de 22.64 dólares por este día.

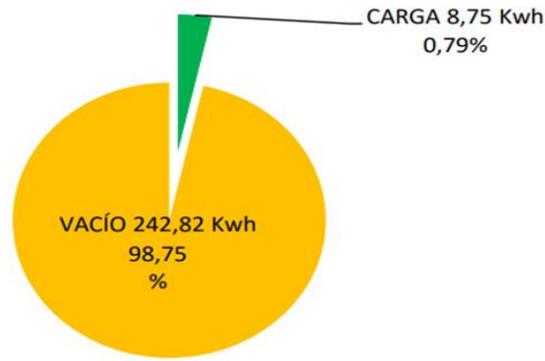


Figura 4. 20 Potencia del compresor N°1 Ingersoll Rand 50HP  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP

- ❖ De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando en carga 23:58:30, es decir, el 100%.
- ❖ El compresor en este día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 650,68 KWh (trabajo) debiendo pagar 58,56 dólares. Por tanto, no hay consumo en vacío.

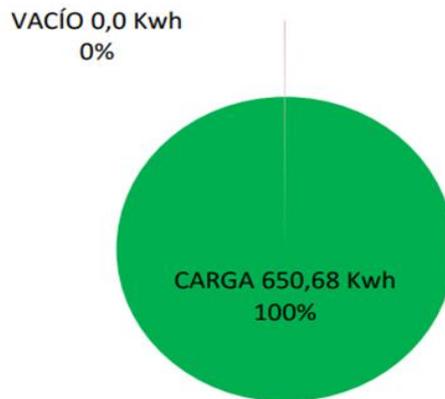


Figura 4. 21 Potencia del compresor N°2 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

### Potencia del compresor N°3 Atlas Copco GA37 50HP

- De las 24 horas del día, el compresor permaneció apagado.

### Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP

- De las 24 horas del día, el compresor estuvo trabajando en carga 21:48:20, es decir, el 99.97%.

- El compresor en este día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 654,65 KWh (trabajo) debiendo pagar 58,92 dólares. Sin embargo, no hay consumo en vacío.

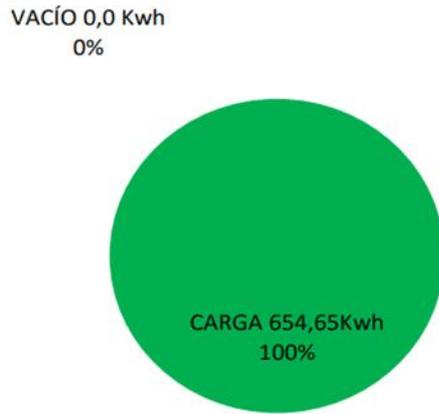


Figura 4. 22 Potencia del compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP  
Fuente. El autor

En la figura 4.23 se puede visualizar las áreas del consumo energético en carga (color verde) y descarga o vacío (color marrón); predominando en este caso el color marrón.

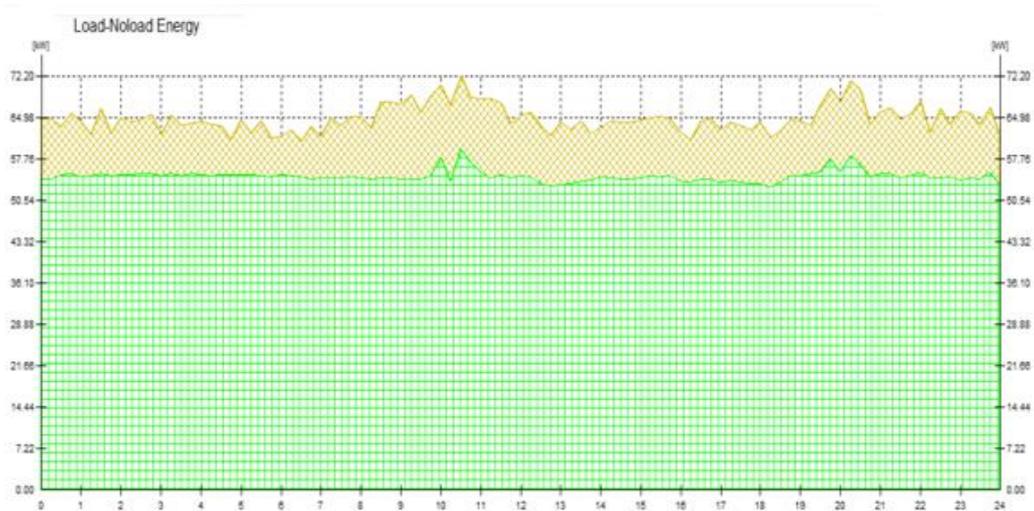


Figura 4. 23 Consumo Energético en Carga-Descarga Vs. Tiempo  
Fuente. El autor

En la tabla 4.8 muestra el resumen de los datos antes mencionados de la tabla 4.7. Además, es importante indicar que el sistema está utilizando el 42% de su capacidad de generación.

Tabla 4. 8 Resumen del comportamiento de los compresores

Measured Data (Measurement We, 30.12.2015)			
Audit Time		23:59:40	[hh:mm:ss]
Compressed Air Consumption		9,612	[m³]
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	1,314	243	1,557 [kWh]
Load / Unload Run	84.4	15.6	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1397	-	0.1620 [kWh/m³]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	6.7	6.6	7.9 [m³/min]
Power Consumption	42.4	41.9	50.2 [kW]
Net Pressure	6.6	6.1	6.9 [bar]
System Utilisation	35.5	35.1	42.0 [%]
Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum		3,509,192	[m³/a]
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	118.-	22.-	140.- [\$]
Energy Costs Per Annum	43,080.-	8,032.-	51,112.- [\$]
Energy Costs Per m³			0.0146 [\$/m³]

Fuente. El autor

## CONCLUSIONES

- Los compresores de la planta son cuatro de tipo tornillo, libre de mantenimiento y eficientes en suministro continuo de aire comprimido las 24 horas del día.
- El equipo Data Logger Boge es un hardware y software que además de evaluar consumo, potencia de la generación de aire comprimido puede calcular el valor comercial del consumo eléctrico.
- Los fines de semana se consideraron con días de bajo consumo de aire presurizado. Mientras días martes, miércoles y jueves se consideran días de alto consumo, es decir con promedio del 95%.
- Los compresores 1 y 3 trabajan adecuadamente, es decir dentro de los parámetros óptimos.
- Dentro de los días de mayor consumo está el segundo día y tercer día (martes, miércoles) y dos compresores demandan de alto caudal de aire comprimido
- El compresor 2 Ingersoll Rand 30HP en las 24 horas del segundo día, estuvo trabajando en carga 23:58:30, es decir, el 100%. Ese día tuvo 1 arranque y 3 ciclos (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es de 643.96 KWh (trabajo), debiendo pagar 57.96 dólares.
- El compresor N°4 Ingersoll Rand 30HP en las 24 horas del segundo día, estuvo trabajando en carga 21:48:20, es decir, el 99.97%. Ese día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 648.54 KWh (trabajo) debiendo pagar 58.37 dólares
- El compresor 2 Ingersoll Rand 30HP en las 24 horas del tercer día, estuvo trabajando en carga 23:58:30, es decir, el 100%. En ese día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 650,68 KWh (trabajo) debiendo pagar 58,56 dólares.
- El compresor 4 Ingersoll Rand 30HP en las 24 horas del tercer día estuvo trabajando en carga 21:48:20, es decir, el 99.97%. En ese día tuvo 1 arranque y 1 ciclo (carga-vacío) por lo que el consumo de energía en carga es 654,65 KWh (trabajo) debiendo pagar 58,92 dólares.

- Al automatizar sistemas neumáticos con un sistema de control PLC se logra suministrar la cantidad de aire inmediatamente requerida a la utilización, dentro de los límites de velocidad programados.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Revisar el sistema de trabajo del compresor (carga y vacío) en el compresor N°1 Ingersoll Rand de 50 Hp porque normalmente pasa solo en vacío.
- ❖ Revisar el seteo de la estación y readecuar de acuerdo con la necesidad de la planta para evitar caídas de presión instantáneas en la red (presión de trabajo en la maquinaria).
- ❖ Realizar un rediseño en la red de distribución de aire comprimido dentro de la planta.
- ❖ El diámetro de la tubería necesaria para abastecer un caudal de 6.7m<sup>3</sup>/min es de 2 ½" como mínimo.
- ❖ Se recomienda instalar un controlador externo para monitorizar el encendido y los ciclos de trabajo (carga y vacío) de los compresores, con la finalidad de evitar un excesivo consumo de amperaje que no produce trabajo, pero genera gastos económicos.
- ❖ Se recomienda tener un sistema de la red de aire comprimido tipo anillo (cerrado).

## BIBLIOGRAFÍA

- Allied Electronics & Automation. (2019). *Conceptos básicos de neumática*.  
Obtenido de <https://www.alliedelec.com/expert/pneumatic-basics/>
- Compressed Air & Gas Institute (CAGI). (2021). *Diseño del sistema de aire comprimido*. Obtenido de [https://www.cagi.org/pdfs/CAGI\\_ElectHB\\_ch4.pdf](https://www.cagi.org/pdfs/CAGI_ElectHB_ch4.pdf)
- Compressed Air Challenge (2006). *Descripción del sistema de aire comprimido industrial*. [https://www-compressedairchallenge-org.translate.google/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-compressedairchallenge-org.translate.google/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc)
- Copper Development Association Inc. (2019). *Calidad energética*. Obtenido de <https://www.copper.org/applications/electrical/pq/primer.html>
- Creative Commons. (2020). *Guía para el tratamiento de aire comprimido*. <https://www.cp.com/es-latinoamerica/compressors/expert-corner/blog/guia-para-el-tratamiento-del-aire-comprimido>
- EACSA. (2017). *Tipos de secadores de aire comprimido*. Obtenido de <https://energiaenaire.com.mx/tipos-secadores-aire-comprimido/>
- Fernández, P. (2015). *Compresores*. Obtenido de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf)
- Festo. (2021). *Energy Saving Services*. Obtenido de [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/430527/Kompflyer\\_EnergySServices\\_en\\_V07\\_m.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/430527/Kompflyer_EnergySServices_en_V07_m.pdf)
- Ghiglia, A. (2021). *Como determinar el consumo de aire comprimido*. Obtenido de <https://ingenieriakaeserargentina.com/2021/02/03/como-determinar-el-consumo-de-aire-comprimido/>
- Ingeniería Mecafenix. (2019). *Tipos de compresores y como funcionan*. Obtenido de <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/tipos-de-compresores/>

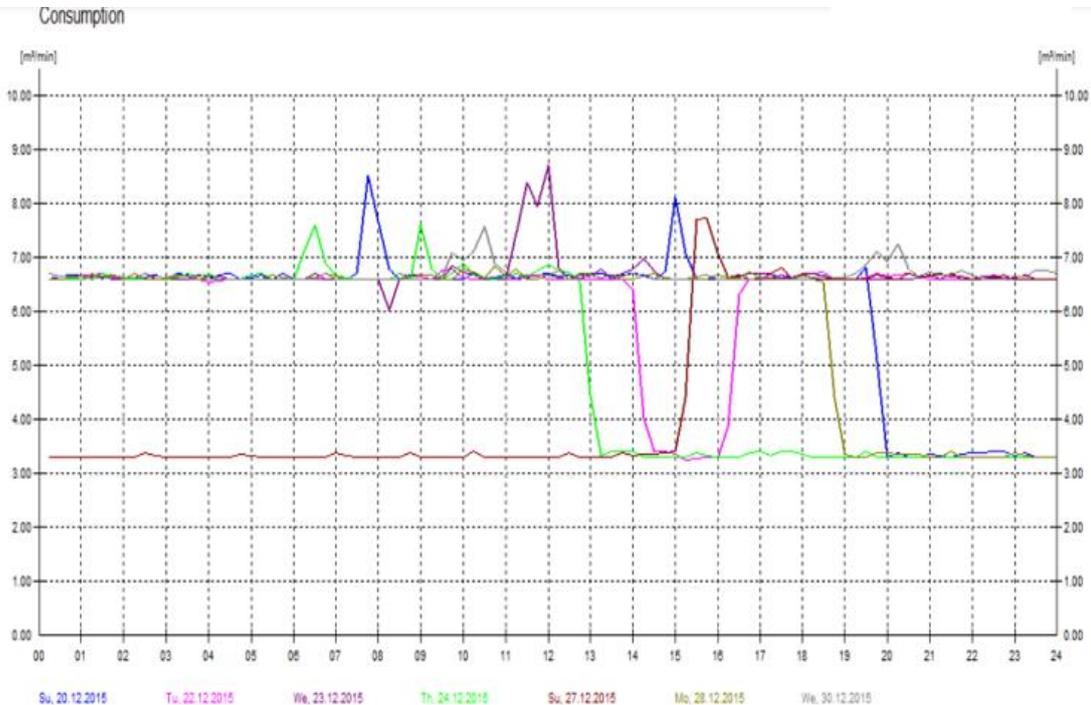
- Ingersoll Rand. (2021). *Compresor centrífugo de aire y gas TA-11000*. Obtenido de <https://www.ingersollrand.com/es-ni/air-compressor/centrifugal-air-compressors/ta-11000>
- Ispat guru. (2018). *Fundamentals of Pneumatics and Pneumatic Systems*. Obtenido de <https://www.ispatguru.com/basics-of-pneumatics-and-pneumatic-systems/>
- Jufend Power. (2021). *Compresor integrado de tornillo rotativo (con inyección de aceite)*. Obtenido de <http://factory-compressor.com.ar/1-2-3-oil-injected-rotary-screw-compressor.html>
- Leal, L. (2021). *Automatización del sistema de aire comprimido para ahorro de energía*. Obtenido de Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0765\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0765_EA.pdf)
- López, J., & Ventura, E. (2019). *Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR: <https://acortar.link/P7LrNZ>
- Mundo Compresor. (2021). *Los diferentes tipos de compresores*. Obtenido de [https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores#compresor\\_de\\_tornillo](https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores#compresor_de_tornillo)
- Nieto, A., & Vega, L. (2008). *El Compresor Scroll Sinónimo de Eficiencia y de Ahorro Energético en Sistemas HVAC&R*. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2008/04/el-compresor-scroll-sinonimo-de-eficiencia-y-de-ahorro-energetico-en-sistemas-hvacr/>
- Ortega, J. (2015). *Compresión en Dos Etapas y Boosters*. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2006/05/65-2/>
- Philco, O. (2019). *Compresor de tornillo*. Obtenido de <https://ing-orlandophilco.jimdofree.com/neum%C3%A1tica/>
- Plastic Technology. (2017). *Secadores de membrana*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/banco-de-conocimiento/secado-de-plasticos/tipos-de-secadores/secadores-de-membrana>

- Preditec. (2016). *Mantenimiento Predictivo*. Obtenido de <http://www.preditec.com/mantenimiento-predictivo/termografia/>
- PUSKA. (2017). *Compresores alternativos*. Obtenido de <https://www.puska.com/es/manual-guia-aire-comprimido/compresores-alternativos>
- Serviaire. (2021). *Cómo funciona un compresor rotativo de tornillo?* Obtenido de <https://www.serviaire.com/recambio-del-airend-en-un-compresor-rotativo-de-tornillo/>
- Widman, R., & Linares, O. (2020). *Compresores – su funcionamiento y mantenimiento*.  
[https://llamados.ancap.com.uy/docs\\_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2025-2018%20-%20AYUDANTE%20T%C3%89CNICO%20PORTLAND%20-%20MEC%C3%81NICO%20-%20PLANTA%20MINAS/2%20MATERIAL%20DE%20ESTUDIO%20-%20CONOCIMIENTOS%20ESPEC%C3%8DFICOS/6%20-%20COMPRESORES/COMPRESORES.PDF](https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2025-2018%20-%20AYUDANTE%20T%C3%89CNICO%20PORTLAND%20-%20MEC%C3%81NICO%20-%20PLANTA%20MINAS/2%20MATERIAL%20DE%20ESTUDIO%20-%20CONOCIMIENTOS%20ESPEC%C3%8DFICOS/6%20-%20COMPRESORES/COMPRESORES.PDF)

## ANEXO:

A continuación, en la siguiente figura se puede observar lo siguiente:

1. El consumo máximo de aire comprimido es 6.7 m<sup>3</sup>/min.

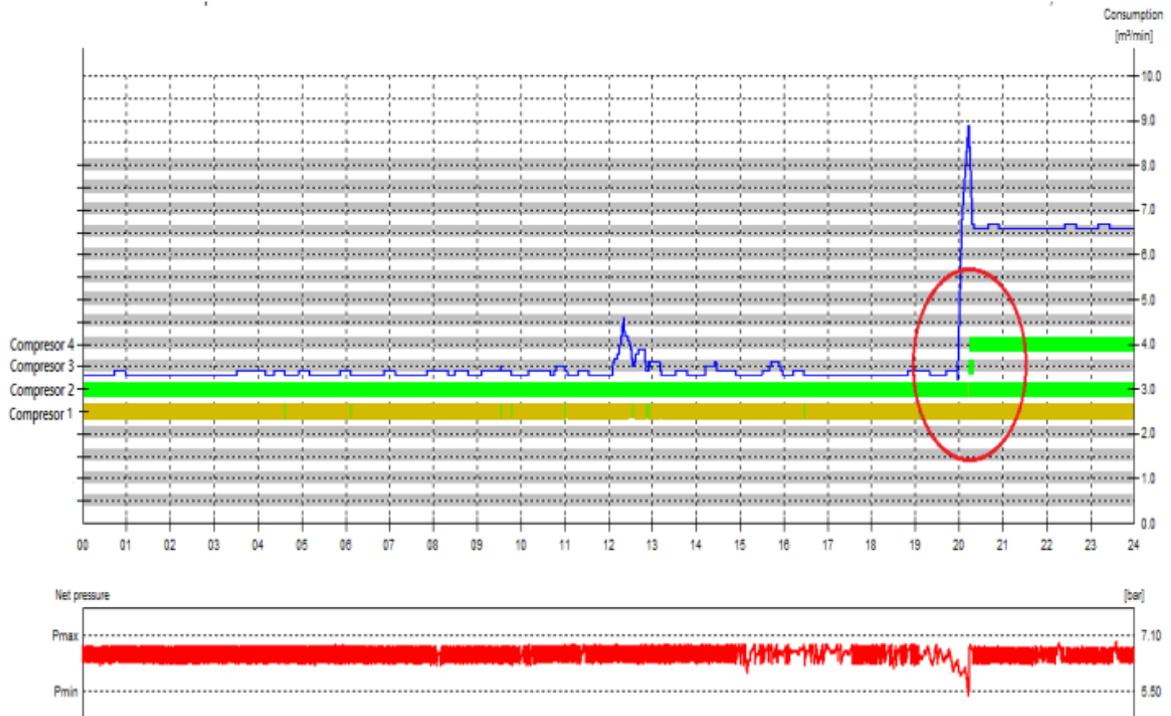


2. La capacidad de generación de aire comprimido es 18.8 m<sup>3</sup>/min, considerando que el compresor N°3 no trabajó en el tiempo de la Auditoría.
3. El caudal de trabajo del secador es 28,3 m<sup>3</sup>/min.
4. La presión máxima de aire comprimido en la red es 7 bar.
5. La presión mínima de aire comprimido en la red es 5.6 bar.
6. La utilización del sistema es el 51.1%.
7. El diámetro de la tubería primaria de aire comprimido en la planta es de 2".
8. El tanque pulmón es suficiente para la generación de aire comprimido.
9. La mayor pérdida económica es en el compresor Ingersoll Rand de 50Hp, que pasa todo el tiempo prendido en estado de vacío.

Site Data (Su, 20.12.2015 - We, 30.12.2015)			
Company	ARCA CONTINENTAL		
Site	STO. DOMINGO TSACHILAS		
Compressor Station	AREA DE COMPRESORES		
Installed Compressor Capacities	18.8 [m <sup>3</sup> /min]		
Installed Compressor Power	119.4 [kW]		
Operating Time Per Annum	305 [days]		
Electrical Cost	0.0900 [\$/kWh]		
Measured Data (Measurement Su, 20.12.2015 - We, 30.12.2015)			
Audit Time	167:57:40 [hh:mm:ss]		
Compressed Air Consumption	59,501 [m <sup>3</sup> ]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Consumption	8,085	1,771	9,856 [kWh]
Load / Unload Run	82.0	18.0	100.0 [%]
Key Performance Indicator	0.1358	-	0.1655 [kWh/m <sup>3</sup> ]
	Average	Minimum	Maximum
Compressed Air Consumption	5.9	3.2	9.6 [m <sup>3</sup> /min]
Power Consumption	37.5	20.3	61.0 [kW]
Net Pressure	6.6	5.9	7.0 [bar]
System Utilisation	31.4	17.0	51.1 [%]
Compressed Air Costs			
Compressed Air Consumption Per Annum	3,105,878 [m <sup>3</sup> /a]		
	Loaded	Unloaded	Total
Energy Costs Measuring Period	728.-	159.-	887.- [\$]
Energy Costs Per Annum	37,969.-	8,293.-	46,262.- [\$]
Energy Costs Per m <sup>3</sup>	0.0149 [\$/m <sup>3</sup> ]		

10. En la siguiente figura muestra el trabajo de los cuatro compresores. La franja de color verde determina el tiempo a plena carga de los equipos. La franja de color marrón es el tiempo en descarga (vacío).

Por consiguiente, el compresor N°3 pasa apagado y se pone en marcha manualmente solo cuando hay caídas de presión para cubrir la mayor demanda de la planta de manera instantánea. Es decir, entra a trabajar en ciclos rápidos de carga y descarga por tan solo cinco minutos y luego es apagado.



11. Se pone en marcha un compresor de 50Hp que genera 6,1 m<sup>3</sup>/min para una breve demanda de 2,5 m<sup>3</sup>/min., equivalente a un compresor de 20 Hp.

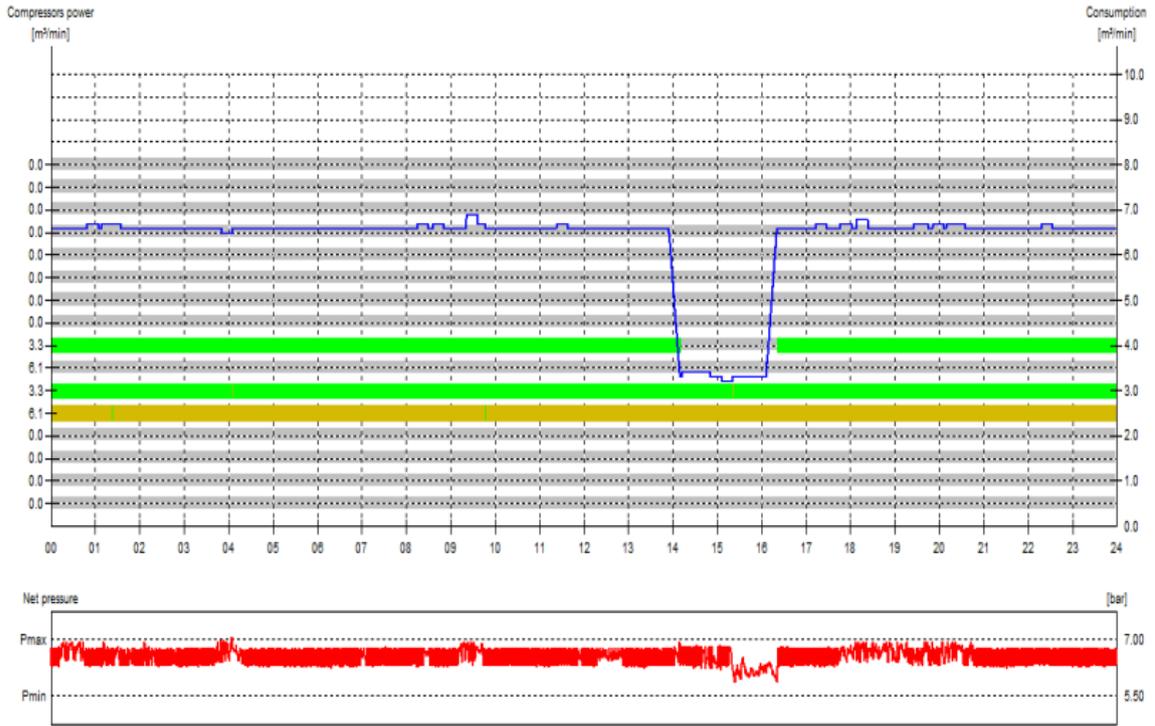
12. Resumen de datos en los días auditados.

DÍA AUDITADO DEL 20.12.15 AL 31.12.15	CONSUMO ENERGÉTICO EN CARGA kWh	CONSUMO ENERGÉTICO EN VACÍO kWh	COSTO ENERGÉTICO EN CARGA Usd (\$)	COSTO ENERGÉTICO EN VACÍO Usd (\$)
INGERSOLL RAND 50 Hp	51.52	1982.96	\$ 4,64	\$ 178,47
INGERSOLL RAND 30 Hp	5001.65	0.37	\$ 450,00	\$ 0,03
ATLAS COPCO 50 Hp	0	0	\$ -	\$ -
INGERSOLL RAND 30 Hp	3875.25	0.34	\$ 348,77	\$ 0,03

COSTO DE ENERGÍA EN EL PERÍODO DE MEDICIÓN	\$ 804,00	\$ 179,00
<b>COSTO DE ENRGÍA PARA UN AÑO</b>	<b>\$ 36.691,00</b>	<b>\$ 8.169,00</b>
<b>COSTO DE ENRGÍA EN CINCO AÑOS</b>	<b>\$ 183.455,00</b>	<b>\$ 40.845,00</b>

Tomando en consideración que el compresor que más consume energía eléctrica en vacío, es el equipo N°1 Ingersoll Rand de 50Hp.







Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Torres Silva, José Omar** con C.C: 0921977328 autor del Trabajo de Titulación **Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial**, 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, 10 de febrero de 2022

---

Torres Silva, José Omar

C.C: 0921977328



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación de la eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Torres Silva, José Omar		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Philco Asqui, Luis Orlando		
<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>TITULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Eléctrico Mecánico		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	9 de marzo del 2022	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	80
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Eficiencia energética, Máquinas eléctricas, Neumática.		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	Aire presurizado, ISO 11011, auditoria energética, compresores, red de distribución.		
<p>El presente trabajo tiene como objetivo principal cumplir con el estudio de eficiencia energética bajo la norma ISO 11011 en el sistema de aire comprimido de una instalación industrial. El cumplimiento de la norma ISO11011 considera los sistemas de aire comprimido en tres etapas: suministro, distribución y demanda de aire comprimido. La metodología utilizada fue; descriptiva para fundamentar la generación y distribución del aire comprimido. Se empleó el método analítico sintético para realizar el levantamiento de equipos de generación y almacenamiento de aire presurizado, Se aplicó el método empírico por el uso de equipamiento y software especializado en obtención de datos o mediciones de consumo energético. Se evalúan fugas y averías del aire presurizado en las instalaciones de la planta. La contribución de este trabajo de titulación propone realizar nuevas configuraciones en la red de distribución que mejoren la eficiencia energética, o bien, realizar modificaciones en el modo de funcionamiento o programación de los equipos existentes en la planta.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 0998520160	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:jose.torres17@cu.ucsg.edu.ec">jose.torres17@cu.ucsg.edu.ec</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@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>			