



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

**PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE  
COMPRESIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A.**

**Joel Rodrigo Arias Galindo**

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, febrero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE  
COMPRESADO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JOEL RODRIGO ARIAS GALINDO**

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

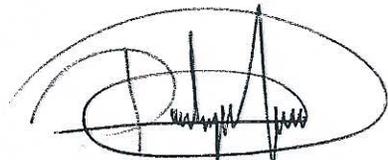
|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Colomba |
| EXAMINADOR | Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  |
| EXAMINADOR | Ing. Roberto Guzmán Ortíz           |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López   |

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 30 de mayo de 2017.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'J. R. Arias Galindo'.

**Joel Rodrigo Arias Galindo**



Guatemala, 31 de octubre de 2017  
REF.EPS.DOC.766.10.17.

Inga. Christa Classon de Pinto  
Directora Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimada Ingeniera Classon de Pinto.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Joel Rodrigo Arias Galindo** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201212564, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A..**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

  
Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo  
EDSZ/ra



Guatemala, 31 de octubre de 2017  
REF.EPS.D.456.10.17

Ing. Roberto Guzmán  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

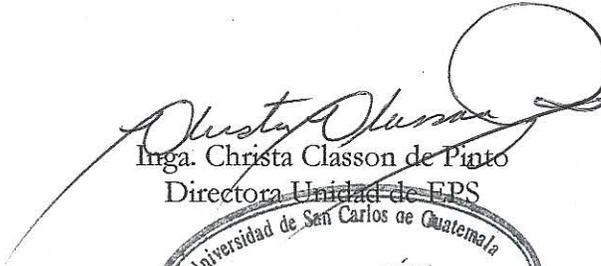
Estimado Ingeniero Guzmán:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Joel Rodrigo Arias Galindo** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

  
Inga. Christa Classon de Pinto  
Directora Unidad de EPS



CCdP/ra



**USAC**  
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.016.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S.A.** del estudiante **Joel Rodrigo Arias Galindo, CUI No. 2287071960601, Reg. Académico No. 201212564** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, febrero de 2018

/aej

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

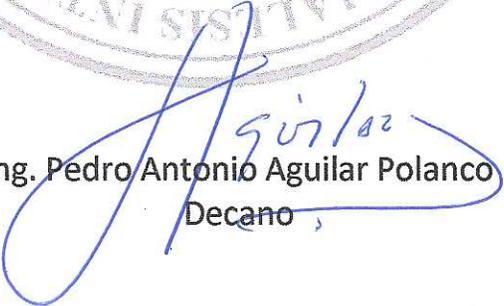


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 038.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA DE AIRE COMPROMIDO PARA LA PLANTA SAN GABRIEL, CEMENTOS PROGRESO, S. A.,** presentado por el estudiante universitario: **Joel Rodrigo Arias Galindo,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, febrero de 2018

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Dios</b>           | Por su amor, sus incontables bendiciones y por permitirme finalizar mis estudios.                                       |
| <b>Mis padres</b>     | Joel Augusto Arias Chinchilla y Dina Nineth Galindo de Arias, por su sacrificio, ayuda, paciencia y amor incondicional. |
| <b>Mis hermanos</b>   | Joel y Eduardo Arias, por la ayuda y el apoyo brindado en el transcurso de mi carrera.                                  |
| <b>Mi familia</b>     | Por su apoyo incondicional.   |
| <b>Mis amigos</b>     | Por la amistad que nos une y por la ayuda brindada.   |
| <b>Mis compañeros</b> | Por el apoyo brindado.  |

## **AGRADECIMIENTOS A:**

|  |   |
|--|---|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>                | Por ser una importante influencia en mi carrera, y ser el centro de enseñanza que me enseñó la responsabilidad, el trabajo y la dedicación. |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                                | Por ser mi segunda casa y por haberme permitido vivir momentos buenos y difíciles.  |
| <b>Mis catedráticos</b>                                      | Por darme los conocimientos necesarios.   |
| <b>Cementos Progreso S.A. y al personal de confiabilidad</b> | Por haberme dado la oportunidad y el apoyo para realizar el presente proyecto.  |



# ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                         | V    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                               | VII  |
| GLOSARIO .....  | IX   |
| RESUMEN.....  | XI   |
| OBJETIVOS .....                                       | XIII |
| INTRODUCCIÓN.....                                     | XV   |
| <br>  |      |
| 1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....                   | 1    |
| 1.1. Descripción de la empresa .....                  | 1    |
| 1.1.1. Ubicación de la planta .....                   | 1    |
| 1.1.2. Historia .....                                 | 1    |
| 1.1.3. Misión.....                                    | 1    |
| 1.1.4. Visión.....                                    | 2    |
| 1.1.5. Valores .....                                  | 2    |
| 1.1.6. Organización de la empresa.....                | 3    |
| <br>  |      |
| 2. SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO .....                   | 5    |
| 2.1. Descripción del problema .....                   | 5    |
| 2.2. Descripción del sistema de aire comprimido ..... | 5    |
| 2.2.1. Elementos de la red de aire comprimido.....    | 6    |
| 2.2.2. Compresores.....                               | 7    |
| 2.2.3. Compresores de desplazamiento positivo .....   | 8    |
| 2.2.3.1. Compresores de pistón .....                  | 8    |
| 2.2.3.2. Compresor de tornillo .....                  | 10   |
| 2.2.3.3. Compresores de paletas .....                 | 12   |

|          |                                       |    |
|----------|---------------------------------------|----|
| 2.2.3.4. | Compresor de lóbulos .....            | 13 |
| 2.2.3.5. | Compresor <i>scroll</i> .....         | 14 |
| 2.2.3.6. | Bombas de vacío .....                 | 16 |
| 2.2.4.   | Compresores dinámicos .....           | 17 |
| 2.2.4.1. | Compresor axial .....                 | 17 |
| 2.2.4.2. | Compresor centrífugo .....            | 19 |
| 2.2.5.   | Separadores.....                      | 20 |
| 2.2.6.   | Válvulas .....                        | 21 |
| 2.2.6.1. | Válvula de presión .....              | 21 |
| 2.2.6.2. | Válvula espiral .....                 | 22 |
| 2.2.7.   | Secadores .....                       | 22 |
| 2.2.8.   | Depósitos.....                        | 22 |
| 2.2.9.   | Tubería .....                         | 22 |
| 2.3.     | Mantenimiento .....                   | 24 |
| 2.3.1.   | Mantenimiento correctivo .....        | 25 |
| 2.3.2.   | Mantenimiento preventivo .....        | 26 |
| 2.3.3.   | Los 5 niveles del mantenimiento ..... | 27 |
| 2.3.3.1. | Nivel 1 .....                         | 28 |
| 2.3.3.2. | Nivel 2 .....                         | 28 |
| 2.3.3.3. | Nivel 3 .....                         | 28 |
| 2.3.3.4. | Nivel 4 .....                         | 28 |
| 2.3.3.5. | Nivel 5 .....                         | 29 |
| 3.       | PROGRAMA DE MANTENIMIENTO .....       | 31 |
| 3.1.     | Seguridad .....                       | 31 |
| 3.1.1.   | Equipos de protección personal.....   | 31 |
| 3.1.2.   | Liberación de presión .....           | 32 |
| 3.1.3.   | Incendio y explosión .....            | 32 |
| 3.1.4.   | Personas encerradas. ....             | 33 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.1.5. | Piezas en movimiento .....   | 33 |
| 3.1.6. | Superficies calientes, aristas y ángulos vivos .....   | 34 |
| 3.1.7. | Sustancias toxicas e irritantes.....   | 34 |
| 3.1.8. | Electrocución.....   | 34 |
| 3.1.9. | Elevación del compresor .....  | 35 |
| 3.2.   | Descripción de los equipos del sistema de aire comprimido en planta San Gabriel.....                 | 36 |
| 3.2.1. | Listado de equipos .....   | 36 |
| 3.2.2. | Compresores Sullair tipo tornillo Mod. LS25S-300H/A/SUL (223.71 KW) (300HP).....                     | 37 |
| 3.2.3. | Separador aceite / agua marca Sullair Mod. OS-128.....   | 41 |
| 3.2.4. | Secador regenerativo con calor reactivado marca Sullair Mod. SSE-1200 de capacidad de 1200 SCFM..... | 43 |
| 3.2.5. | Tubería .....  | 47 |
| 3.3.   | Procedimiento de revisión del cuarto de compresores .....  | 48 |
| 3.4.   | Rutinas de mantenimiento preventivo.....   | 51 |
| 3.4.1. | Compresor de aire tipo tornillo .....  | 51 |
| 3.4.2. | Separador aceite / agua .....  | 53 |
| 3.4.3. | Secador de aire .....  | 54 |
| 4.     | AHORRO ENERGÉTICO .....  | 57 |
| 4.1.   | Medición de valores de los compresores .....   | 57 |
| 4.1.1. | Análisis energético .....  | 71 |
| 4.2.   | Recomendaciones para reducir el costo energético .....   | 73 |
| 4.2.1. | Apagado de los compresores.....  | 74 |
| 4.2.2. | Arreglo de posibles fugas .....  | 74 |
| 4.2.3. | Prevención de nuevas fugas .....   | 75 |

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Organigrama .....   | 3  |
| 2.  | Clasificación de los compresores .....                        | 8  |
| 3.  | Compresor de pistón .....                                     | 10 |
| 4.  | Compresor de tornillo. ....                                   | 12 |
| 5.  | Compresor de paletas .....                                    | 13 |
| 6.  | Compresor de lóbulos .....                                    | 14 |
| 7.  | Bomba de vacío.....   | 17 |
| 8.  | Compresor de flujo axial .....                                | 18 |
| 9.  | Gráfica del comportamiento de presiones del compresor 1 ..... | 67 |
| 10. | Gráfica del comportamiento de potencias del compresor 1 ..... | 68 |
| 11. | Gráfica del comportamiento de presiones del compresor 2 ..... | 70 |
| 12. | Gráfica del comportamiento de potencias del compresor 2 ..... | 71 |
| 13. | Costos asociados a la generación de aire comprimido .....     | 74 |

## TABLAS

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | Materiales, ventajas y desventajas.....                  | 23 |
| II.  | Equipos del sistema de aire comprimido.....              | 36 |
| III. | Procedimiento de revisión de cuarto de compresores ..... | 48 |
| IV.  | Inspecciones diarias .....                               | 51 |
| V.   | Inspecciones mensuales .....                             | 51 |
| VI.  | Inspecciones semestrales.....                            | 52 |
| VII. | Inspecciones anuales .....                               | 52 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| VIII.  | Inspecciones diarias .....                                   | 53 |
| IX.    | Inspecciones mensuales .....                                 | 53 |
| X.     | Inspecciones semestrales .....                               | 53 |
| XI.    | Inspecciones diarias .....                                   | 54 |
| XII.   | Inspecciones mensuales .....                                 | 55 |
| XIII.  | Inspecciones semestrales .....                               | 55 |
| XIV.   | Inspecciones anuales .....                                   | 55 |
| XV.    | Datos recabados durante la semana de trabajo .....           | 58 |
| XVI.   | Promedio de mediciones obtenidas del compresor 1 .....       | 65 |
| XVII.  | Datos del compresor 2 .....                                  | 68 |
| XVIII. | Conversión de consumo de aire comprimido .....               | 71 |
| XIX.   | Cálculo de costo anual .....                                 | 72 |
| XX.    | Ahorros potenciales de energía .....                         | 73 |
| XXI.   | Costos a diferentes presiones de un orificio de ¼ pulg. .... | 75 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b> | <b>Significado</b>                      |
|----------------|---|
| <b>bar</b>     | Bar. Unidad de presión                  |
| <b>hp</b>      | Caballos de fuerza                      |
| <b>gal</b>     | Galón                                   |
| <b>°C</b>      | Grados centígrados                      |
| <b>°F</b>      | Grados Fahrenheit                       |
| <b>gr</b>      | Gramos                                  |
| <b>h</b>       | Hora                                    |
| <b>kW</b>      | Kilovatios                              |
| <b>lbf</b>     | Libra fuerza                            |
| <b>psi</b>     | Libras por pulgada al cuadrado          |
| <b>psig</b>    | Libras por pulgada al cuadrado relativa |
| <b>l</b>       | Litros                                  |
| <b>m</b>       | Metros                                  |
| <b>mg</b>      | Miligramos                              |
| <b>mm</b>      | Milímetros                              |
| <b>pulg</b>    | Pulgada                                 |
| <b>rpm</b>     | Revoluciones por minuto                 |



## GLOSARIO

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Adsorción</b>        | Es el proceso de remoción del vapor de agua del aire comprimido, es decir la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido. |
| <b>Aire</b>             | Es una mezcla de gases que existen en el ambiente compuesta de nitrógeno, oxígeno y otras sustancias, como ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles.                                  |
| <b>Aire húmedo</b>      | El aire húmedo se da cuando su composición presenta un porcentaje apreciable de vapor de agua.   |
| <b>Alúmina activada</b> | Es una forma porosa y adsorbente, tiene la propiedad de secar el aire hasta dejarle muy poca humedad.  |
| <b><i>Blasters</i></b>  | Una herramienta para facilitar el manejo de materiales a granel, libera ráfagas de aire para liberar acumulaciones atrapadas de material y obligarlos a fluir.                                   |
| <b>Caudal</b>           | Es el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.  |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>CFM</b>            | Pies cúbicos por minuto, consumo de aire.   |
| <b><i>Clinker</i></b> | Material que se obtiene de la transformación de carbonato de calcio y óxidos de sílice, aluminio, hierro y magnesio en un horno rotativo. |
| <b>Condensado</b>     | Es el líquido formado cuando el vapor pasa de fase gas a fase líquida.  |
| <b>EPP</b>            | Equipo de protección personal.  |
| <b>Mantenimiento</b>  | La acción que tiene como objetivo preservar o mantener un estado óptimo.  |
| <b>Micrón</b>         | Denominación del micrómetro.  |
| <b>ppm</b>            | Partículas por millón.  |
| <b>Presión</b>        | Se define como la razón de la fuerza por área.  |
| <b>psi</b>            | Libra por pulgada cuadrada.   |
| <b>Purga</b>          | Toda el agua que se condensa en el depósito de aire comprimido.   |
| <b>Temperatura</b>    | Grado o nivel térmico de un cuerpo.   |
| <b>TRT</b>            | Tasa de rendimiento total.  |

## RESUMEN

El aire comprimido es una de las formas de energía más importantes dentro del proceso de fabricación de cemento. En la planta San Gabriel de Cementos Progreso S.A., se utiliza para la alimentación del anillo de suministro y funcionamiento de equipos.

Se realizó el estudio de los compresores de tornillo, separadores, secadores y tubería, ya que son parte del sistema de aire comprimido, para así poder conocer su funcionamiento y principios de operación. También se estudiaron los parámetros que solicita el fabricante para la correcta instalación de los accesorios y el ambiente en el cual estarán funcionando.

Como parte del mantenimiento preventivo del sistema de aire comprimido, se verificó que el montaje estuviera de manera correcta y que los componentes del equipo se encontraran en estado óptimo, de igual manera se revisó la instalación de la tubería que forma el anillo de suministro de aire, sugiriendo la menor cantidad de accesorios, para reducir el coeficiente de fricción y supervisando la inexistencia de fugas.

Con el mantenimiento preventivo del sistema se busca mejorar la calidad y disponibilidad del aire comprimido en todas las áreas, garantizando su funcionamiento y calidad del aire en instrumentación neumática en el proceso de fabricación de cemento. Se realizó una rutina de mantenimiento para el sistema de aire comprimido, tomando en cuenta el tipo de especialidad, siendo estas: mecánica, eléctrica, instrumentista y de lubricación. También se tomó en

cuenta la cantidad de personal necesario para la actividad y la frecuencia de estas prácticas.

Finalmente, se presenta el plan de ahorro energético, con recomendaciones a seguir para reducir el consumo eléctrico de los compresores, separadores y secadores, para así evitar un impacto ambiental en el proceso de generación de aire comprimido. Se hizo la propuesta de un ahorro en el presupuesto, analizando el consumo eléctrico de los compresores del área de trituración y buscando mejorar el hábito de ahorro energético.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Efectuar el mantenimiento preventivo del sistema de aire comprimido en la planta San Gabriel de Cementos Progreso, S.A., en San Juan Sacatepéquez.

### **Específicos**

1. Elaborar una guía de mantenimiento para compresores de tornillo, separadores, secadores y tubería, los cuales forman la red de aire comprimido.
2. Describir el funcionamiento de los compresores de tornillo, separadores, secadores y tubería.
3. Garantizar que no exista impacto al medio ambiente por descarga de condensado con contenidos contaminantes (sólidos y líquidos menores de 3 ppm).
4. Garantizar que los equipos se mantengan en su rango de operación.
5. Capacitar al personal técnico y operario sobre el uso correcto de los equipos, de los manuales de operación y del plan de mantenimiento preventivo.



## INTRODUCCIÓN

Dentro de la empresa Cementos Progreso S.A., el mantenimiento preventivo del sistema de aire comprimido es muy importante, ya que se necesita un buen funcionamiento de todos los equipos que lo componen para mantener la presión establecida en el anillo de suministro. El mantenimiento preventivo en la empresa está basado en los manuales del fabricante de los equipos, y el personal contratista es el responsable de ejecutar el mismo.

El presente trabajo de graduación establece un manual de mantenimiento preventivo actualizado, mejorado y adaptado a las condiciones y necesidades de la planta, buscando que cualquier técnico de la empresa pueda comprenderlo, con las respectivas normas de seguridad internas que deben seguirse al momento de realizar un mantenimiento de este tipo, comprendiendo de mejor manera lo que el personal contratista le realiza a los equipos del sistema de aire comprimido.



# **1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA**

## **1.1. Descripción de la empresa**

### **1.1.1. Ubicación de la planta**

El proyecto San Gabriel está ubicado en la Finca San Gabriel Buena Vista, Aldea Cruz Blanca, en el Municipio de San Juan Sacatepéquez, kilómetro 46. Cuenta con 900 hectáreas, de las cuales serán utilizadas 746 para uso forestal, 64 están en uso por parte de la fábrica, 60 funcionan como cantera y 30 se utilizarán en caminos para mantenimiento de bosque.

### **1.1.2. Historia**

La trayectoria de Progreso inicia con la empresa Cementos Novella, fundada por el Ing. Carlos Federico Novella Klée, misma que con los años cambia su nombre a Cementos Progreso, S.A. En 1899 se inicia la fabricación de cemento tipo Portland. Desde entonces la empresa ha operado continuamente produciendo y comercializando materiales para la industria de la construcción, como cemento, cal, agregados, concreto premezclado, morteros, mezclas secas, entre otras aplicaciones especiales.

### **1.1.3. Misión**

- “Producimos y comercializamos cemento y otros materiales para la construcción acompañados de servicio y de alta calidad.

- Dar a nuestro personal la oportunidad de desarrollarse integralmente y reconocer su desempeño.
- Impulsar con nuestros proveedores una relación de confianza, cooperación y beneficio mutuo.
- Contribuir al desarrollo de la comunidad además de proteger y mejorar el medio ambiente.
- Abastecer con eficiencia el mercado y cultivar con nuestros clientes una relación duradera para su mejor opción.
- Garantizar a nuestros accionistas una rentabilidad satisfactoria y sostenible”<sup>1</sup>.

#### **1.1.4. Visión**

“Compartimos sueños, construimos realidades”<sup>2</sup>.

#### **1.1.5. Valores**

“El código de valores, ética y conducta -COVEC- constituye el principal punto de referencia para nuestro trabajo cotidiano. Tanto las estrategias, proyectos, campañas, como la actividad misma de cada día deben estar acorde con su contenido. Los cuatro pilares que ha guiado a nuestra empresa desde sus orígenes y orientan nuestra conducta son comportamiento ético, liderazgo genuino, solidaridad y compromiso con la sostenibilidad de la empresa”<sup>3</sup>.

---

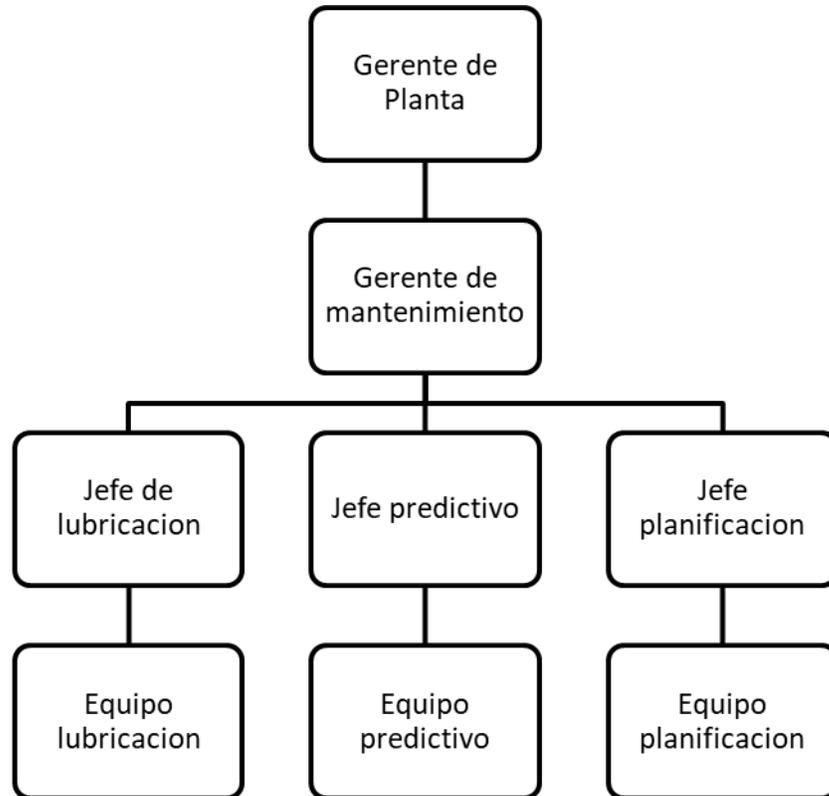
<sup>1</sup> Cementos Progreso. *Historia, misión, visión, valores.*  
<http://www.cempro.com/index.php/quienes-somos> Fecha de consulta: abril 2017.

<sup>2</sup> *Ibíd.*

<sup>3</sup> *Ibíd.*

### 1.1.6. Organización de la empresa

Figura 1. Organigrama



Fuente: elaboración propia.



## **2. SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**

### **2.1. Descripción del problema**

La planta se encuentra en proceso de montaje, de manera que gerencia está analizando la propuesta del plan de mantenimiento preventivo para el sistema de aire comprimido.

### **2.2. Descripción del sistema de aire comprimido**

El sistema de aire comprimido se encuentra en la mayoría de instalaciones industriales. El proyecto está enfocado en el estudio de un sistema de aire comprimido en una planta de cemento. En la planta, el aire comprimido tendrá dos funciones, las cuales se dividen en:

- Aire de operación: utilizado en las válvulas de accionamiento de los equipos de la planta. El aire es comprimido, ingresa al separador, luego es enviado al secador, almacenado, y finalmente ingresa al anillo de suministro para la alimentación.
- Aire de servicios: aire utilizado para las herramientas dentro de la planta para trabajos de conservación y reparación (pistola, martillo, pulidora, llaves de impacto, etc.). Están conectadas al anillo de suministro de aire comprimido en las secciones de tomas de aire.
- Aire de limpieza: usado en la recolección de polvo y en la limpieza de los filtros (sopleteado de filtros).

El aire comprimido tiene como materia prima el aire atmosférico, el cual se puede tomar en la cantidad necesaria gratis y se comprime utilizando equipos denominados compresores. El aire atmosférico es aspirado y es comprimido hasta llegar al valor de presión requerido y superior al de la presión atmosférica. Una vez comprimido se hace pasar por el separador, el refrigerador final, el separador de condensados, enviado al secador y, por último, ingresado al tanque de almacenamiento listo para su uso.

Dentro de la planta en general el aire comprimido será utilizado para el accionamiento de válvulas de control, actuadores de precisión, *blasters*, limpieza de filtros y servicios generales. Los equipos accionados en la planta tienen la función de control de procesos. El aire comprimido utilizado debe ser de una calidad superior al 90 %, debido a la precisión de sus componentes. Para evitar la presencia de condensados el contenido de humedad tiene que ser lo más bajo posible, para que el punto de rocío sea siempre superior a la menor temperatura en cualquier lugar de la red.

### **2.2.1. Elementos de la red de aire comprimido**

Los elementos que forman parte de la red de aire comprimido son:

- Compresores
- Separadores
- Válvulas
- Secadores
- Depósitos
- Tubería

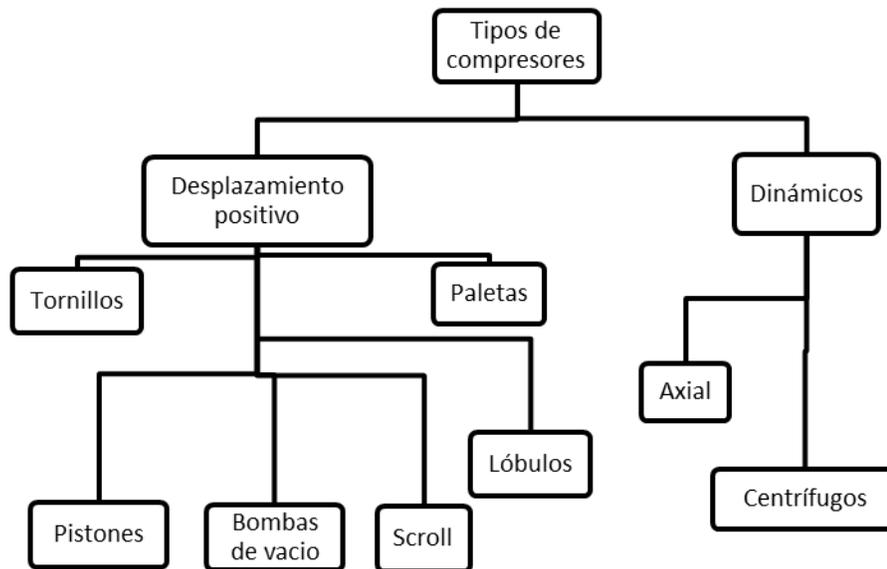
### **2.2.2. Compresores**

Son máquinas que sirven para comprimir un gas, un vapor o una mezcla de gases y vapores. Los compresores de aire son equipos de accionamiento inmediato por medio de diferencias de presiones. La presión de fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. Por la manera de comprimir los gases, existen dos tipos de compresores, de desplazamiento positivo y los dinámicos.

En los compresores de desplazamiento positivo, la presión aumenta por la disminución del volumen de gas confinado en una cámara y la compresión es pulsante, es decir, no es continua. Entre estos se encuentran: pistones, tornillo, paletas y lóbulos. En los compresores dinámicos, la elevación de la presión del gas se logra por la transformación de la energía cinética en energía de presión, y el proceso de compresión es continuo. Entre estos se encuentran axiales y centrífugos.

En el proyecto serán utilizados únicamente compresores de tornillo rotativo. A continuación se describirán los diferentes tipos de compresores para poder tener una comparación y poder entender un poco más de estos.

Figura 2. **Clasificación de los compresores**



Fuente: elaboración propia.

### **2.2.3. Compresores de desplazamiento positivo**

En los compresores de desplazamiento positivo el gas o aire se confina en un recipiente, y el volumen que ocupa se reduce mecánicamente, causando un incremento en la presión de descarga.

#### **2.2.3.1. Compresores de pistón**

Es el tipo de compresores en que el aire es aspirado al interior de un cilindro, por la acción de un pistón accionado por una biela y un cigüeñal. Ese mismo pistón, al realizar el movimiento contrario, comprime el aire en el interior

del mencionado cilindro, liberándolo a la red o a la siguiente etapa, una vez alcanzada la presión requerida.

El gas a comprimir entra, a presión ambiental, por la válvula de admisión en el cilindro, aspirado por el movimiento descendente del pistón, que tiene un movimiento alternativo mediante el cigüeñal, se comprime cuando el pistón asciende y se descarga, comprimido, por la válvula de descarga. En estos compresores la capacidad se ve afectada por la presión de trabajo. Esto quiere decir que una presión baja implica un caudal menor; para una presión de descarga mayor, también se tiene un caudal menor.

Este tipo de compresores es usado para baja, media y alta presión. Se pueden lograr presiones máximas de 60 psig para una etapa y de 220 psig para dos etapas. Las ventajas que se pueden obtener al trabajar con este tipo de compresor son:

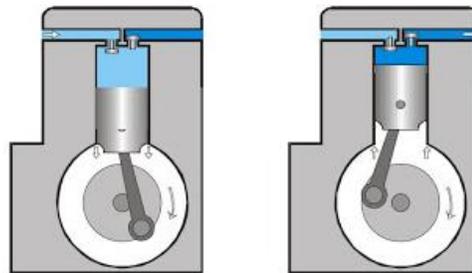
- Larga duración: los materiales utilizados en la fabricación de compresores de pistón deben ser de alta calidad y alta resistencia a la fricción y al desgaste.
- Capacidad de compresión variable: depende de la cantidad de cilindros, la capacidad de compresión puede aumentar o disminuir, según las necesidades del proceso.
- Los compresores de pistón pueden adaptarse al tipo de uso y de proceso industrial para el que se requieran.

Los inconvenientes de trabajar con este tipo de compresor son:

- La temperatura del aire comprimido es elevada, aumentando el nivel de humedad en la red de suministro de aire comprimido.

- Necesita mantenimientos periódicamente, ya que sufre desgaste en los anillos, permitiendo el paso del aceite y contaminando el aire de suministro.
- Un nivel de ruido alto.

Figura 3. **Compresor de pistón**



Fuente: *Compresor de pistón*. <http://industrial-automatizada.blogspot.com/2010/08/compresores-neumaticos.html>

Consulta: 6 de abril de 2017.

### 2.2.3.2. **Compresor de tornillo**

Este tipo de compresores serán utilizados dentro de la planta para el sistema de aire comprimido. Son de desplazamiento positivo y ofrecen un caudal elevado y estable en condiciones de presión variables. Estas características lo hacen ideal para las instalaciones de aire comprimido.

Las piezas principales del compresor de tornillo son los rotores macho y hembra, que giran en direcciones opuestas mientras disminuye el volumen entre ellos y la carcasa. Cada elemento del tornillo tiene una relación de presiones integrada fija, que depende de su longitud, del paso del tornillo y de la forma de la lumbrera de descarga. Para lograr la máxima eficiencia la relación de presiones integrada debe adaptarse a la presión de trabajo requerida.

Estos compresores son fáciles de conservar, la salida de aire es lisa y libre de impulsos que se pueden hallar en otros modelos de compresores, tienen un gran volumen de aire a una gran presión. Los compresores de tornillo tienen un ciclo permisible de 100 % y pueden operar continuamente, ya que el compresor es enfriado por fluido, el cual realiza cuatro funciones importantes:

- Lubricar los rodamientos
- Remover contaminantes del aire
- Formar un sello entre los rotores y la carcasa
- Remover el calor generado por la compresión

Son de larga duración y de rápido funcionamiento. Las ventajas de utilizar este tipo de compresores son:

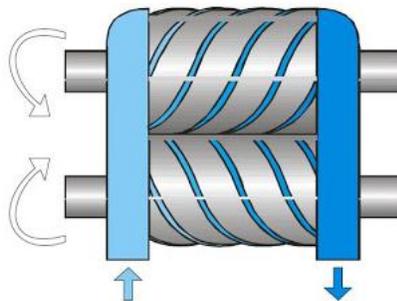
- Caudal permanente (eficiencia volumétrica no varía)
- Presión constante por modulación
- Ahorra energía por sistema de control
- Sistema de control por modulación y sistema carga-no carga
- No necesita cimentación
- No vibra
- Bajo nivel de ruido
- Bajo mantenimiento
- Los rotores no tocan entre sí, baja velocidad en tornillos y motor
- Dispositivos de seguridad
- Bajo consumo de fluido

Consta de un bloque de un tornillo, un motor eléctrico, un sistema de admisión del bloque de tornillo, un sistema de descarga del compresor, un sistema de refrigeración y de lubricación del compresor, sistema de control de la

capacidad y *supervisor controller*, así como un sistema de microprocesador y *starter*, todos montados en un *chasis* de acero.

En los modelos refrigerados por aire, un ventilador aspira el aire en el motor de ventilador y lo empuja a través del refrigerador final y el refrigerador de fluido, liberando así el aire comprimido y el fluido de refrigeración del calor de la compresión.

Figura 4. **Compresor de tornillo**



Fuente: *Compresor de tornillo*. <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/08/compresores-neumaticos.html>

Consulta: 17 de abril de 2017.

### 2.2.3.3. **Compresores de paletas**

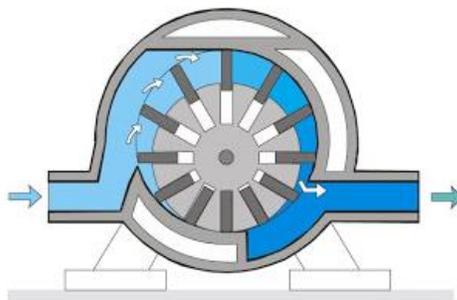
Es un compresor de desplazamiento positivo. El compresor de paletas usa un rotor excéntrico con paletas oscilantes para su funcionamiento. El funcionamiento consiste en la instalación de un rotor de paletas flotantes en el interior de una carcasa, situándolo de forma excéntrica a la misma.

Durante el giro del rotor, las paletas flotantes salen y entran desde su interior, formando unas cámaras entre el rotor y la carcasa, que se llenan con el aire. Al estar situado el rotor en una posición excéntrica al eje central de la carcasa, las cámaras van creciendo en la zona de aspiración, llegando a

producir una depresión que provoca la entrada del aire. Se desplazan con el giro del rotor, las cámaras se van reduciendo hacia la zona de impulsión, comprimiendo el aire interior. Entrega presiones máximas de 60 psig para el de una etapa y de 120 psig para el de dos etapas. Este compresor es menos ruidoso y la entrega de caudal es más uniforme, comparada con el compresor de pistón. Al utilizar este tipo de compresores se obtienen las siguientes ventajas:

- Funcionamiento silencioso
- No emplean válvulas
- Puede emplear accionamiento directo
- Bajo mantenimiento

Figura 5. **Compresor de paletas**



Fuente: *Compresor de paletas*. <http://industrial-automatiza.blogspot.com/2010/08/compresores-neumaticos.html>

Consulta: 6 de abril de 2017.

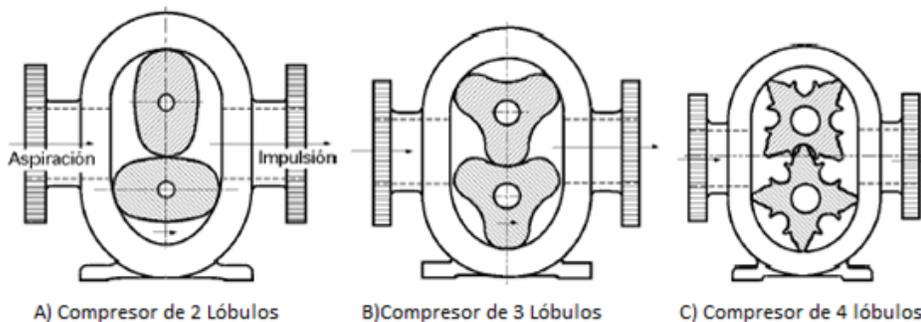
#### **2.2.3.4. Compresor de lóbulos**

Es un compresor de desplazamiento positivo. Este tipo de compresor usa unos rotores de lóbulos o émbolos rotativos para comprimir el aire. El principio

de funcionamiento está basado en el giro de dos rotores de lóbulos en el interior de la carcasa.

Los rotores giran de forma sincronizada y en sentido contrario, formando entre ellos unas cámaras en las que entra el aire. Los lóbulos se limitan a desplazar el aire, consiguiendo aumentar la presión en función de la contrapresión con la que se encuentra en la salida del equipo. Esta contrapresión viene dada por las pérdidas por rozamiento y las necesidades de presión del sistema con el que trabaja. Alcanzan presiones muy bajas, por lo que su uso es muy restringido en aplicaciones neumáticas.

Figura 6. **Compresor de lóbulos**



Fuente: *Compresor de lóbulos*. <http://rogelioatenco.blogspot.com/2015/05/compresores-neumaticos.html>

Consulta: 6 de abril de 2017.

### 2.2.3.5. **Compresor scroll**

Compresores de desplazamiento positivo, los cuales están conformados por un rotor en forma espiral y excéntrico respecto al árbol del motor, que rueda sobre la superficie del estator y que en lugar de ser circular tiene forma de espiral concéntrica con el eje del motor.

La superficie de contacto entre ambas espirales se establece en el estator y en el rotor. Existe otra diferencia fundamental respecto a los compresores rotativos de paletas, y es que la espiral móvil del rotor no gira solidariamente, sino que se traslada paralelamente a sí misma. El funcionamiento de este tipo de compresores se basa en que las celdas o cámaras de compresión de geometría variable y en forma de hoz, están generadas por dos caracoles o espirales idénticas, una de ellas, la superior que está fija (estator), en cuyo centro está situada la lumbrera de escape, y la otra orbitante (rotor), estando montadas ambas frente a frente, en contacto directo una con otra.

La espiral fija y la móvil, cuyas geometrías se mantienen en todo instante desfasadas un ángulo de  $180^\circ$ , cuenta con un dispositivo antirotación, están encajadas una dentro de la otra de modo que entre sus ejes hay una excentricidad, para conseguir un movimiento orbital del eje de la espiral móvil alrededor de la espiral fija. Las tres fases de su funcionamiento son las siguientes:

- Aspiración: en la primera orbita ( $360^\circ$ ) en la parte exterior de las espirales se forman y llenan completamente de vapor a la presión atmosférica dos celdas.
- Compresión: en la segunda orbita ( $360^\circ$ ) se produce la compresión a medida que dichas celdas disminuyen de volumen y se acercan hacia el centro de la espiral fija, alcanzándose al final de la segunda orbita, cuando su volumen cambia y la presión de escape aumenta.
- Descarga: en la tercera y última orbita, puestas ambas celdas en comunicación con la lumbrera de escape, tiene lugar la descarga (escape) a través de ella.

Las ventajas de utilizar un compresor de *scroll* son:

- Nivel de ruido bajo
- Bajo mantenimiento
- Adaptabilidad axial y radial
- Ausencia de válvulas de admisión
- Buen rendimiento volumétrico

El compresor de *scroll* tiene limitación en su tamaño, ya que únicamente se fabrica en tamaños pequeños y es utilizado para alimentaciones de baja presión.

#### **2.2.3.6. Bombas de vacío**

Las bombas de vacío son también equipos de desplazamiento positivo, existen bombas de vacío de pistón, tornillo, paletas o lóbulos. El funcionamiento de las bombas de vacío es similar al de un compresor, pero con la característica para aspirar del interior de un recipiente o red y no para comprimir el aire o gas que aspiran.

Las bombas de vacío cuentan con un anillo líquido, en estos equipos hay un rotor de paletas fijas, instalado de forma excéntrica en la carcasa de la bomba. En el interior de la carcasa hay un fluido que generalmente es agua; cuando el rotor gira a su velocidad nominal, la fuerza centrífuga que ejerce sobre el fluido hace que este se pegue a las paredes internas de la carcasa, formando con las paletas del rotor unas cámaras de aspiración y compresión, cuyo funcionamiento es similar al del compresor de paletas.

Figura 7. **Bomba de vacío**



Fuente: *Bomba de vacío*. <http://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores>

Consulta: 19 de abril de 2017.

## **2.2.4. Compresores dinámicos**

Los compresores dinámicos aumentan directamente la velocidad del gas. Se utilizan mucho en las aplicaciones que requieren mucho volumen de aire a baja presión.

### **2.2.4.1. Compresor axial**

El compresor axial consiste en un rotor de forma cilíndrica que gira dentro de una carcasa o estator. El fluido de trabajo circula por el espacio anular entre el rotor y el estator, pasando por hileras de álabes fijos y móviles. El aire es tomado por el conjunto de álabes móviles e impulsado hacia atrás en sentido axial y entregado al conjunto de álabes fijos con una mayor velocidad. Los álabes fijos actúan como difusor en cada etapa, transformando la energía cinética del aire en energía potencial en forma de presión y, a su vez, dan al flujo el ángulo adecuado para entrar en los álabes móviles de la siguiente etapa.

El rotor está generalmente compuesto de discos en cuyas periferias se montan los álabes móviles. Los álabes, tanto fijos como móviles, de los

compresores axiales, son en su mayoría del tipo de reacción. Debido a la rotación de la cascada de álabes del rotor, el aire adquiere una velocidad tangencial que proporciona un momento cinético respecto del eje del rotor, mediante el cual se comunica un trabajo al aire para la elevación de presión.

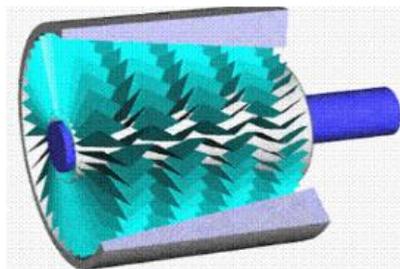
Las ventajas al utilizar este tipo de compresor son:

- Menor área frontal
- Mayor relación de compresión
- Mayor eficiencia
- Menores pérdidas de energía

Es importante mencionar los inconvenientes de este tipo de compresores:

- Difícil manufactura y alto costo de producción
- Alto consumo de potencia
- Bajo incremento
- Peso mayor
- Fragilidad de los álabes

Figura 8. **Compresor de flujo axial**



Fuente: *Compresor de flujo axial*. <http://ojjf7a.blogspot.com/2009/10/compresor-axial.html>

Consulta: 24 de abril de 2017.

#### 2.2.4.2. Compresor centrífugo

El compresor centrífugo es un dispositivo de tipo dinámico, no de desplazamiento positivo como el resto de los equipos utilizados en máquinas de compresión. Está constituido por una o más ruedas impulsoras montadas sobre un eje y contenidas dentro de una carcasa. El aumento de presión se consigue por conversión desde energía cinética. El principio de operación de un compresor centrífugo es:

- El vapor a baja presión y con baja velocidad, proveniente de la tubería de succión, se introduce en la cavidad interna u ojo de la rueda impulsora a lo largo de la dirección del eje del rotor.
- Una vez en la rueda, el vapor es forzado a salir radialmente hacia el exterior por la acción de los álabes del impulsor y por la fuerza centrífuga desarrollada en la rotación de la rueda.
- El vapor es descargado a una velocidad alta, habiendo experimentado asimismo un aumento de temperatura y presión.
- Cuando deja la periferia de la rueda es conducido a unos pasadizos situados en el cuerpo del mismo compresor y que están especialmente diseñados para reducir la velocidad del vapor. Estos dirigen al vapor hacia la entrada del siguiente impulsor o, en el caso del último paso, lo descargan a una cámara desde donde el vapor pasa a la tubería de descarga hacia el condensador.

Aumento de energía cinética en rodete:

- Este proceso tiene lugar en el rodete que tiene como misión acelerar el gas, que es aspirado axialmente hacia el centro del rodete, y cambia su dirección en 90° convirtiéndolo en un flujo radial.

- Cuando el rodete de un turbo compresor centrífugo gira en presencia de un gas, la fuerza centrífuga le empuja desde la boca de entrada del rodete hasta el final del álabe.

### **2.2.5. Separadores**

Los separadores aceite-agua están diseñados para separar el aceite de los compresores de líquido de condensación sin necesidad de emplear energía externa. La mezcla condensada aceite / agua debe extraerse del sistema de aire comprimido mediante un método de drenaje adecuado a la unidad. Las salidas de los purgadores de condensación deben descargar en un colector que recoja el líquido de condensación aguas arriba del separador de aceite / agua. El líquido de condensación procedente del sistema entrará a presión en el separador y se expandirá en la cámara de admisión centrífuga, especialmente diseñada para ello.

Al contacto del caudal de aire con las paredes de la cámara y el generador de torbellinos, irá goteando líquido, que desaguará sin turbulencias por la cámara de sedimentación primaria, situada por debajo. Las partículas de suciedad suspendidas en el líquido de condensación se depositarán en el fondo de la cámara de sedimentación primaria, y el líquido de condensación acumulado pasará entonces al depósito principal de sedimentación. Las gotas de aceite arrastradas, dispersas en el agua, subirán a la superficie debido al menor peso específico del aceite, y acabarán formando una delgada capa superficial.

Un embudo ajustable especialmente diseñado lo evacúa continuamente de la superficie. El aceite evacuado se recoge en un contenedor externo en el que puede desecharse de conformidad con la normativa aplicable. El agua del

fondo del depósito, más limpia de aceite, pasa a la etapa de carbono a través de un sorbete, situado en la parte superior de las bolsas de carbono. Las gotas de aceite arrastradas que quedan en el agua se eliminan por adsorción. El agua limpia puede descargarse con seguridad al sumidero de aguas residuales a través del desagüe de salida.

## **2.2.6. Válvulas**

### **2.2.6.1. Válvula de presión**

También llamadas válvulas de seguridad, están diseñadas para aliviar la presión cuando un fluido supera el límite preestablecido. Su principal función es evitar la explosión del sistema protegido o el fallo de un equipo o tubería por exceso de presión.

- **Mecánicas:** consiste en un tapón que mantiene cerrado el escape. Un resorte calibrado mantiene este tapón en posición evitando que el fluido se escape del depósito o tubería. Cuando la presión interna del fluido supera la presión de tarado del resorte el tapón cede y el fluido sale por el escape.
- **Eléctricos:** cuentan con dos módulos, un presostato y una electroválvula. Se puede ajustar el presostato para que dispare la electroválvula a la presión deseada y así controlar los tiempos de disparo.
- **Electrónicos:** tiene un transductor de presión que envía una señal a un cuarto de control. El operador, de manera manual, o programando una computadora, decide a qué presión se abra o cierra la electroválvula.

### **2.2.6.2. Válvula espiral**

Desvía y controla internamente la capacidad de flujo de aire del compresor, para igualar el suministro de aire en función de la demanda.

### **2.2.7. Secadores**

El aire entra en el secador procedente de un filtro previo que retira la contaminación para proteger el desecante y es conducido a la torre de secado. El desecante retira la humedad del aire por adsorción, y el aire seco pasa por un filtro posterior eliminando cualquier partícula antes de entrar en el sistema de aire, ya que en el secador con aporte de calor el aire entra caliente en la zona de regeneración, debido a que el aire ambiente ingresa por la entrada del ventilador, elevándose así la temperatura del aire cuando se mueve por el calentado externo.

### **2.2.8. Depósitos**

El recipiente es un cilindro de acero sobre un faldón que le permite operar en posición vertical, cuya finalidad es acumular y distribuir aire comprimido. El recipiente está diseñado para recibir aire comprimido a la presión máxima indicada y este será su único uso. Está fabricado de acero al carbón seleccionado de acuerdo a la temperatura y presión máxima de diseño.

### **2.2.9. Tubería**

El funcionamiento correcto de una red de distribución de aire comprimido es un punto importante para asegurar una presión estable en todos los puntos

de uso. El diámetro de la red tiene un impacto importante en la caída de presión del sistema.

La selección del material de la tubería para un sistema de aire comprimido afecta directamente tres elementos clave: flujo, presión y calidad del aire. Una elección inadecuada en el material de la tubería, diámetro o diseño del sistema, provocan restricciones de flujo dando como resultado caídas de presión significativas. A continuación se presenta la tabla con ventajas y desventajas de algunos materiales para tuberías de sistemas de aire comprimido.

Tabla I. **Materiales: ventajas y desventajas**

| Materiales               | Ventajas   | Desventajas  |
|--------------------------|--|--|
| <b>Acero negro</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo de material moderado.</li> <li>- Disponibilidad de múltiples diámetros.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Largo tiempo de instalación.</li> <li>- Fugas y oxidación.</li> <li>- La rugosidad del interior promueve la formación de contaminantes provocando caídas de presión.</li> </ul>   |
| <b>Acero galvanizado</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo moderado de materiales.</li> <li>- Disponibilidad de múltiples diámetros.</li> <li>- Protección ligera contra oxidación.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ocasionalmente solo el exterior es galvanizado.</li> <li>- Largo tiempo de instalación.</li> <li>- La rugosidad del interior promueve la formación de contaminantes provocando caídas de presión.</li> <li>- Riesgo de oxidación y fugas en uniones.</li> </ul> |
| <b>Cobre</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay oxidación, buena calidad del aire.</li> <li>- Baja rugosidad en el interior del tubo (caída de presión mínima).</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere buena calidad de soldadura para evitar fugas.</li> <li>- La soldadura es susceptible a ciclos térmicos.</li> <li>- La instalación requiere de flama abierta.</li> </ul>  |

Continuación tabla I.

|                                |  |   |
|--------------------------------|--|---|
| <p><b>Acero inoxidable</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay oxidación.</li> <li>- Buena calidad de aire.</li> <li>- Baja rugosidad en el interior del tubo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Largo tiempo de instalación</li> <li>- Alto costo del material.</li> </ul>   |
| <p><b>PVC</b></p>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligero.</li> <li>- Económico.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Poca seguridad.</li> <li>- En algunos lugares no cumple determinadas normas.</li> <li>- Puede acumular carga estática.</li> <li>- Tendencia a estallido en caso de fallo.</li> <li>- Los adhesivos no son compatibles con los tipos de aceite utilizado en los compresores.</li> </ul> |
| <p><b>Aluminio</b></p>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistente a la corrosión.</li> <li>- Ligero.</li> <li>- Fácil de instalar.</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo del material.</li> </ul>  |

Fuente: Kaeser Compressors. *Guía de instalación de sistemas de aire comprimido*. Fecha de consulta: abril 2017.

### 2.3. Mantenimiento

Es la actividad humana que conserva la calidad del servicio que presentan las máquinas, instalaciones y edificios en condiciones seguras, eficientes y económicas. Puede ser correctivo si las actividades son necesarias debido a que dicha calidad del servicio ya se perdió, y preventivo si las actividades se ejecutan para evitar que disminuya la calidad del servicio.

### **2.3.1. Mantenimiento correctivo**

Es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son comunicados al departamento de mantenimiento. Características:

- Altos costos de mano de obra, y se precisa de gran disponibilidad de la misma.
- Los niveles de inventario de repuestos deberán ser altos, de tal manera que puedan permitir efectuar cualquier daño imprevisto.
- Este tipo de mantenimiento es inevitable, dado que es imposible evitar alguna falla en un momento determinado.

Ventajas:

- No genera gastos fijos
- No es necesario programar ni prever ninguna actividad
- Solo se gasta dinero cuando está claro que se necesita hacerlo
- A corto plazo puede ofrecer un buen resultado económico

Desventajas:

- Tiempos muertos por fallas repentinas.
- Una falla pequeña que no se prevenga puede con el tiempo hacer fallar otras partes del mismo equipo, generando una reparación mayor.
- Es muy usual que el repuesto requerido en un mantenimiento correctivo no se encuentre disponible en el almacén, debido a los altos costos.
- Si la falla sucede en una situación en la que no se puede detener la producción.

Existen dos formas diferentes de mantenimiento correctivo: el programado y el no programado. La diferencia entre ambos radica en que el no programado supone la reparación de la falla inmediata después de presentarse, el mantenimiento correctivo programado supone la corrección de la falla cuando se cuenta con el personal, las herramientas, la información y los materiales necesarios y, además, se realiza la reparación de acuerdo a las necesidades de producción. La decisión entre corregir un fallo de forma planificada o de forma inmediata suele marcarla la importancia del equipo en el sistema productivo: si la avería supone la parada inmediata de un equipo necesario, la reparación comienza sin una planificación previa. Si, en cambio, puede mantenerse el equipo o la instalación operativa, aun con este fallo presente puede posponerse la reparación hasta que llegue el momento más adecuado.

### **2.3.2. Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo busca evitar las averías actuando antes de que surjan. Normalmente se hace sustituyendo piezas de desgaste antes del fin de su vida útil. También puede tratarse de acciones de limpieza o lubricación.

Este sistema permite planificar la intervención, puesto que la máquina o instalación trabaja de forma correcta. Al conocer de antemano los recursos necesarios, se puede planificar una parada preventiva que afecte lo menos posible a la producción. Las ventajas de un mantenimiento preventivo son:

- Mayor seguridad para el operario.
- Máxima disponibilidad de la maquinaria.
- Mayor productividad.
- Menor coste en mantenimiento y en reparaciones.
- Mayor duración de los equipos.

- Disminuye los tiempos muertos, existen menos paros imprevistos.
- Disminuye el pago de horas extras al personal de mantenimiento en ajustes ordinarios y en reparaciones de paros imprevistos.
- Existirá un menor número de productos rechazados, menos desperdicios, mejor calidad y, por lo tanto, el prestigio de la empresa crecerá.
- Aumenta la vida útil de los equipos.
- Cumplimiento de la producción comprometida.
- Se conoce anticipadamente el presupuesto de costos de mantenimiento.

Es necesario establecer las etapas de un mantenimiento preventivo:

- Puntos de revisión de la planta.
- Normas de revisión y tiempo estimado por la misma.
- Periodicidad.
- Fijación de rutas.
- Personal necesario.
- Planeamiento de las revisiones.
- Emisión de órdenes de trabajo.

### **2.3.3. Los 5 niveles del mantenimiento**

Las acciones realizadas en el mantenimiento, independientemente de las acciones del correctivo o preventivo, no presentan el mismo alcance o profundidad. Se encuentran acciones de distinta importancia y otras que llegan a ser profundas y extensas. Las intervenciones de mantenimiento suelen ser clasificadas en 5 niveles, donde se expresan por números bajos, tareas sencillas y rutinarias, como suelen ser los ajustes, hasta llegar los números elevados, los cuales representan tareas complejas y requieren de personal calificado para la intervención.

#### **2.3.3.1. Nivel 1**

En este nivel se encuentran las tareas más sencillas, las cuales se encuentran en el manual del fabricante, no suelen requerir desmontaje de componentes y no presentan ningún riesgo ni dificultad en la manipulación.

#### **2.3.3.2. Nivel 2**

El nivel 2 de mantenimiento queda definido por operaciones sencillas relacionadas principalmente con el cambio de componentes estándar, lo cual puede tener relación directa con el mantenimiento preventivo, o antes del fallo, correctivo, es decir, cuando este ya esté dado.

#### **2.3.3.3. Nivel 3**

En este nivel se aplica un mantenimiento correctivo, ya que las actividades corresponden a reparación o sustitución de componentes, en los cuales el fallo o avería no estaba prevista. También puede ser ampliado a preventivo, ya que en numerosas ocasiones también se identifican las causas o motivos que han proporcionado la intervención.

#### **2.3.3.4. Nivel 4**

Este nivel corresponde a grandes operaciones, bien de carácter preventivo o correctivo, son ejecutadas por personal interno de mantenimiento, son trabajos que requieren una importante dedicación del departamento y, en la medida posible, deberán planificarse con el objeto de que estos no afecten la producción.

#### **2.3.3.5. Nivel 5**

En este nivel se realizan acciones confiadas a talleres centrales, los cuales son los encargados de la creación de piezas o reparación de las mismas. En otras ocasiones las tareas pueden ser confiadas a otras empresas con mayor experiencia. Es habitual realizar intervenciones por subcontratación, y es beneficioso a nivel económico, ya que evita disponer de personal especializado para intervenciones muy concretas y esporádicas.



### **3. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO**

Todos los sistemas mecánicos y eléctricos requieren de diversos puntos de atención para asegurar que operen eficientemente. Es recomendable invertir en mantenimiento preventivo, en lugar de sufrir costosos tiempos muertos por reparaciones. Es importante establecer rutinas de mantenimiento, para tener control de los equipos y que la operación sea la correcta. En cada uno de los equipos y componentes del sistema de aire comprimido, el mantenimiento preventivo busca un desempeño óptimo y dar mayor duración de los equipos.

Dentro de la empresa el punto más importante es la seguridad y salud ocupacional. Como parte del plan de mantenimiento se evaluaron los riesgos, los cuales se podrían presentar al momento de realizar el mantenimiento preventivo. A continuación se presenta el normativo de seguridad para el sistema de aire comprimido.

#### **3.1. Seguridad**

##### **3.1.1. Equipos de protección personal**

Antes de instalar o hacer funcionar los equipos, los operadores y los usuarios deben respetar la reglamentación que se refiera a los equipos de protección personal (EPP), como los equipos de protección de ojos y de la cara, los equipos de protección respiratorios, los equipos diseñados para la protección de extremidades, las prendas de protección, las pantallas y las barreras de protección y el equipo de protección eléctrica, así como los niveles de exposición al ruido.

### **3.1.2. Liberación de presión**

- Instalar una válvula de regulación de caudal entre la salida hacia la red de aire y la válvula de retención en el compresor.
- Las válvulas de regulación deber ser seleccionadas en función del tamaño de la tubería y del caudal nominal en CFM.
- Fijar las conexiones por medio de alambres metálicos, de cadenas o cualquier otro dispositivo adecuado para evitar la desconexión.
- No abrir el tapón de llenado de fluido cuando el compresor esté fuera de servicio y no bajo presión.
- Descargar toda la presión interna antes de abrir un conducto, una conexión, un tubo flexible, una válvula, un tornillo de descarga o cualquier otro tipo de componente, como los filtros y lubricantes de conductos.
- Mantener al personal fuera del alineamiento y a distancia de aberturas de descarga de los tubos o cualquier otro punto de distancia.
- No jugar con los tubos de aire.
- Direccionar la descarga de la válvula de seguridad hacia un lugar no expuesto.

### **3.1.3. Incendio y explosión**

- Limpiar inmediatamente todas las cantidades de lubricante u otras sustancias.
- Parar el compresor y dejarlo enfriar. Mantener lejos del compresor cualquier fuente de chispa, de llamas u otras fuentes de inflamación; debe estar prohibido fumar cerca de los procesos de control.
- No utilizar disolventes inflamables para la operación de limpieza.

- Desconectar y bloquear cualquier alimentación antes de intentar reparar o limpiar el compresor.
- Mantener la instalación eléctrica en buen estado. Cuidar el estado de limpieza de los bornes y la solidez de las conexiones.
- Mantener una correcta conexión a tierra de los compresores.
- Antes de efectuar operaciones o reparación por soldadura, desmontar el aislamiento acústico y retirar todos los materiales que puedan ser dañados por el calor.
- Conservar uno o varios extintores llenos, al momento de reparar y utilizar el compresor.
- Cerciorarse de que ningún material ha quedado atrapado en el interior del compresor.
- No utilizar el compresor con un caudal de aire insuficiente, para evitar calentamiento excesivo de sus componentes.

#### **3.1.4. Personas encerradas**

- Comprobar que no hay nadie en el interior de la caja de aislamiento del compresor antes de cerrar y bloquear las trampillas de acceso.

#### **3.1.5. Piezas en movimiento**

- Mantener las manos, los brazos y las demás partes del cuerpo, así como prendas de vestir lejos de las correas, de las poleas y de las demás piezas en movimiento.
- No hacer funcionar el compresor cuando el ventilador, el acoplamiento u otro dispositivo de protección está desmontado.
- Usar ropa ajustada y ocultar los cabellos largos.

- Mantener todas las piezas en movimiento con sus dispositivos de protección.
- Antes de proceder a reparar o ajustar, desconectar y bloquear cualquier alimentación eléctrica al equipo.
- Mantener el área limpia.

### **3.1.6. Superficies calientes, aristas y ángulos vivos**

- Evitar todos los contactos del cuerpo con el aceite, el refrigerante y con las superficies calientes.
- Mantener todas las partes del cuerpo alejadas de los puntos de la descarga del aire comprimido.
- Cuando se trabaje en el compresor, llevar equipos de protección incluyendo guantes y casco.
- Mantener un botiquín de primeros auxilios al alcance de la mano.

### **3.1.7. Sustancias tóxicas e irritantes**

- No utilizar el aire del compresor para fines respiratorios.
- Llevar gafas de protección o una máscara facial al añadir anticongelante en los sistemas de refrigeración.
- En caso de contacto accidental con los ojos, lavar con abundante agua durante 15 minutos. Consultar inmediatamente a un médico.

### **3.1.8. Electrocutión**

- Toda instalación eléctrica solo debe hacerla personal formado y habilitado.

- Mantener todas las partes del cuerpo y las herramientas manuales o los demás objetos conductores, a distancia de las piezas expuestas del sistema eléctrico en tensión.
- Las operaciones de reparación solo deben efectuarse en lugares limpios, secos, bien iluminados y bien ventilados.
- No dejar el compresor sin vigilancia con los armarios eléctricos abiertos.
- Desconectar, bloquear y poner una etiqueta en todos los orígenes de alimentación antes de efectuar reparaciones o ajustes en los dispositivos rotativos y antes de manipular cables conductores que no estén conectados a tierra.
- Después de instalar el compresor es conveniente probar en seco todos los circuitos de puesta en parada.

### **3.1.9. Elevación del compresor**

- Si el compresor está provisto de una empuñadura de elevación, levantarlo por dicha empuñadura.
- Antes de proceder a la elevación, comprobar que no hay soldaduras, fisuras y elementos fisurados, torcidos, oxidados o degradados.
- Cerciorarse de que el gancho de elevación esté bien provisto de un dispositivo de seguridad.
- Utilizar cuerdas de guiado o un dispositivo equivalente para impedir toda clase de rotación o de oscilación.
- No intentar proceder a la elevación de la máquina con vientos fuertes.
- Alejar al personal de debajo de la máquina y de las cercanías de la misma cuando esté colgando.
- No levantar el compresor más arriba de lo necesario.

### 3.2. Descripción de los equipos del sistema de aire comprimido en planta San Gabriel

Para poder conocer y entender el plan de mantenimiento que será realizado, se explicarán y se detallarán los datos técnicos y funcionamiento de los compresores de tornillo, separadores, secadores y de la tubería de la red del sistema de aire comprimido.

#### 3.2.1. Listado de equipos

Tabla II. Equipos del sistema de aire comprimido

| <b>Listado de equipos del sistema de aire comprimido</b> |   |
|--|---|
| <b>Compresor tipo tornillo:</b>                          |   |
| <b>No.</b>   | <b>Potencia (Hp)</b>                    |
| 1  | 300                                     |
| 2  | 300                                     |
| 3  | 300                                     |
| 4  | 300                                     |
| 5  | 300                                     |
| 6  | 300                                     |
| 7  | 300                                     |
| 8  | 300                                     |
| 9  | 300                                     |
| 10   | 300                                     |
| <b>Separadores:</b>                                      |   |
| <b>No.</b>   | <b>Rendimiento de separación (mg/l)</b> |
| 1  | 20                                      |
| 2  | 20                                      |
| 3  | 20                                      |
| 4  | 20                                      |
| 5  | 20                                      |
| 6  | 20                                      |
| 7  | 20                                      |
| 8  | 20                                      |
| 9  | 20                                      |
| 10   | 20                                      |

Continuación tabla II.

| <b>Secadores</b> |                     |
|------------------|---------------------|
| <b>No.</b>       | <b>Flujo (SCFM)</b> |
| 1                | 1200                |
| 2                | 1200                |
| 3                | 1200                |
| 4                | 1200                |
| 5                | 1200                |
| 6                | 1200                |
| 7                | 1200                |
| 8                | 1200                |
| 9                | 1200                |
| 10               | 1200                |

Fuente: elaboración propia.

### **3.2.2. Compresores Sullair tipo tornillo Mod. LS25S-300H/A/SUL (223.71 KW) (300HP)**

Compresor de tornillos asimétricos de desplazamiento positivo, de una etapa de compresión, con inyección de fluido, de alta eficiencia volumétrica y constante, tipo paquete y enfriado por aire. Esta unidad se surte con fluido Sullbe sintético, a base de poliglycol que no contiene hidrocarburos, lo que impide formación de barnices y carbonilla, de acción prolongada, permitiendo usarse en períodos de 8000 horas o 1 año de operación.

- Ventajas
  - Caudal permanente (eficiencia volumétrica)
  - Presión constante por modulación
  - Ahorra energía por el sistema de control
  - Sistema de control por modulación y sistema carga-no carga
  - No necesita cimentación

- No vibra
- Bajo nivel de ruido
- Bajo mantenimiento
- Los rotores no tocan entre sí, baja velocidad en tornillos y motor
- Tipo paquete listo para arranque
- Dispositivos de seguridad
- Bajo consumo de fluido
  
- Características de operación
  - Presión de trabajo 8,61 BAR (125 psig)
  - Caudal de aire libre 2259,68 AM3/H (1330 ACFM)  
1490,03 NM3/H (906,40 NCFM)
  - Potencia del motor 223,71 KW (300HP)
  - Potencia del paquete 307,7 KW
  - Corriente de operación 3/60/460V
  - Velocidad del motor 1800 r.p.m.
  - Enfriamiento Aire
  - Capacidad de fluido 132,49 litros (35 Gal)
  - Nivel de ruido a 1 m 83 dBA
  - Consumo de lubricante 5,39 gr/h (0,00 Kg/hr)
  - Consumo eléctrico 0,1219 KWh/AM3  
0,1789 KWh/NM3
  
- Dimensiones y peso
  - Largo 3,91 m (154 Pulg.)
  - Ancho 1,52 m (78 Pulg.)
  - Alto 2,18 m (86 Pulg.)

- Peso 4881,81 Kg (10760 Lbs)
- Alcance del suministro
  - Elemento compresor
    - Integrado por rodamientos para cargas axiales y radiales con vida útil esperada de 100 000 horas, tornillos asimétricos de desplazamientos positivos, admisión axial.
  - Carga inicial de fluido
    - SULLUBE-32. Lubricante sintético biodegradable, no impregna barnices a la unidad de compresión.
  - Dispositivos de paro
    - Por alta temperatura de aire de descarga
    - Por alta presión de aire de descarga
    - Por sobrecarga del motor
  - Filtro de succión
    - Tipo pesado con elemento de filtración, acción centrifuga y colector de polvos.

- Tablero de instrumentos

Control eléctrico tipo microprocesador Supervisor Controller en el que se puede programar y monitorear parámetros de operación:

- Presión del aire de descarga.
  - Presión del recipiente del fluido.
  - Temperatura de aire de descarga.
  - Horómetro.
  - Diferencial de presión en separador de aire-aceite, filtro de aceite y de aire.
  - Selección de control automático o manual.
- Recipiente del separador aire-aceite, diseñado bajo normas ASME:
    - Válvula de presión mínima
    - Válvula de seguridad
  - Sistema de lubricación a presión
    - Cambiador de calor
    - Válvula termostática
    - Filtro de fluido
    - Válvula de contraflujo al compresor

### **3.2.3. Separador aceite / agua marca Sullair Mod. OS-128**

Separador de aceite-agua con capacidad del depósito principal de 485 litros (128 gal), unidad de una sola pieza, construcción de polietileno resistente a la corrosión. Diseñado con grandes capacidades de depósitos principales, primario y vías internas que reducen el riesgo de taponaduras y facilitan su mantenimiento. Cuenta con prefiltros de adsorción de aceite y etapa de carbón. Tiene integrado contenedor externo de aceite para su fácil manejo y disposición del mismo.

- Principio de funcionamiento

Los separadores aceite-agua están diseñados para separar el aceite de los compresores del líquido de condensación sin necesidad de emplear energía externa. La mezcla condensada aceite/agua debe extraerse del sistema de aire comprimido mediante un método de drenaje adecuado a la unidad.

Las salidas de los purgadores de condensación deben descargar en un colector que recoja el líquido de condensación aguas arriba del separador de aceite/agua. El líquido de condensación procedente del sistema entrará a presión en el separador y se expandirá en la cámara de admisión centrífuga, especialmente diseñada para ello.

Al contacto con el caudal de aire con las paredes de la cámara y el generador de torbellinos, irá goteando el líquido, que desaguará sin turbulencias por la cámara de sedimentación primaria, situada por debajo. Las partículas de suciedad suspendidas en el líquido de condensación se depositarán en el fondo de la cámara de sedimentación primaria y el líquido de condensación acumulado pasará entonces al depósito principal de sedimentación.

Las gotas de aceite arrastradas, dispersas en el agua, subirán a la superficie debido al menor peso específico del aceite, y acabarán fusionándose para formar una delgada capa superficial. Con un embudo ajustable, el aceite se evacúa continuamente de la superficie. El aceite evacuado se recoge en un contenedor externo en el que puede desecharse adecuadamente.

El agua del fondo del depósito, más limpia de aceite, pasa a la etapa de carbono a través de un sorbete, situado en la parte superior de las bolsas de carbono. Las gotas de aceite arrastradas que quedan en el agua se eliminan por adsorción. En este punto el agua limpia puede descargarse con seguridad al sumidero de aguas residuales a través del desagüe de salida.

- Especificaciones

|   |                                |                    |        |
|---|--------------------------------|--------------------|--------|
| ○ | Conexión de entrada mm (Pulg)  | 25                 | (1)    |
| ○ | Conexión de salida mm (Pulg)   | 25                 | (1)    |
| ○ | Capacidad del depósito l (Gal) | 485                | (128)  |
| ○ | Presión máxima Bar (psig)      | 16                 | (232)  |
| ○ | Temperatura mínima °C (°F)     | 5                  | (41)   |
| ○ | Temperatura máxima °C (°F)     | 35                 | (95)   |
| ○ | Material (Reciclable)          | <i>POLYETHLENE</i> |        |
| ○ | Peso vacío Kg (Lbs)            | 97                 | (214)  |
| ○ | Peso lleno Kg (Lbs)            | 550                | (1210) |
| ○ | Largo mm (Pulg)                | 850                | (34)   |
| ○ | Ancho mm (Pulg)                | 1000               | (39)   |
| ○ | Alto mm (Pulg)                 | 1535               | (60)   |
| ○ | Rendimiento de separación      | 20 mg/l            |        |

### **3.2.4. Secador regenerativo con calor reactivado marca Sullair Mod. SSE-1200 de capacidad de 1200 SCFM**

- Descripción

Secador regenerativo con calentador externo integrado, tipo dos torres, con contenido de camas alúmina, activadas como medio disecante operando bajo el principio de adsorción; diseñado para temperaturas debajo del punto de congelación 40 °C.

- Principio de operación

Adsorción es el proceso de remoción de vapor de agua del aire comprimido. El aire es automáticamente ciclado a través de dos cámaras de disecante, una de las cámaras estará en línea con el aire comprimido adsorbiendo su humedad, la otra cámara estará fuera de línea a presión atmosférica (0 psig), siendo regenerada por aire de purga calentado, seco y de baja presión.

Los modelos SSE consumen aproximadamente del 5 % al 7 % del flujo de aire comprimido de diseño para purga. Esta purga es tomada desde el aire seco de salida regulado por controles de flujo reduciendo hasta 0 psig. El aire es así calentado de 204 °C – 232.22 °C y dirigido a través de una válvula *check* de purga a la cámara de disecante para la regeneración. La humedad se retira del disecante y se expulsa a la atmósfera a través de la válvula de escape y del silenciador, logrando así la regeneración.

- Alcance de suministro
  - Calentador externo (13 Kw)
    - Carcaza aislada, elementos con forro de baja densidad, con indicador de temperatura, protección contra sobrecalentamiento vía alarma y paro. Dispositivos de seguridad en el microprocesador que evitan la activación del calentador por baja presión de purga.
  - Disecante de alúmina activada
    - Las altas porosidades de las capas de desecante proveen de una alta superficie específica y una gran capacidad de adsorción por unidad de peso. Este material es duro y resistente a los golpes dentro del tanque para una mayor duración y obtención del punto de rocío.
  - Válvulas de conmutación no lubricadas
    - Tipo de disparo mecánico, diseñadas para baja caída de presión en los modelos pequeños. Para los modelos grandes se usan válvulas de mariposa o válvulas *check*.
  - Control de purgas

Se realiza por medio de válvulas de ajuste manual para poner el flujo óptimo de purga a la salida del secador en turno. La salida de la purga incluye un silenciador para una operación sin ruido.

- Circuito de represurización
  - Una válvula de dos vías actúa como puente para asegurar la igualación de presiones en ambas torres antes que actúe la conmutación. Esto previene un golpe de presión y, por lo tanto, una condensación de humedad, así como un arrastre de desecante.
  
- Torres de desecante
  - Los tanques contienen un retenedor de desecante de acero inoxidable extra reforzado, así como los distribuidores de flujo. También incluyen orificios para recambio de desecante sin necesidad de desconectar la línea de aire.
  
- Conexión eléctrica
  - 460/3/60.
  
- Instrumentación

Avanzado microprocesador, panel con *display* de texto, menús interactivos, *display* anunciador de secuencia, con luces activas indicadoras y alarma preventiva del sistema. Contiene una válvula economizadora de aire ajustable manualmente, así como indicador de flujo de purga.

- Filtro de control
  - El filtro de aire y su bala de aislamiento protegen al solenoide piloto y a los actuadores neumáticos.
  
- Unidad paquete
  - Paquete totalmente ensamblado en una base metálica tipo industrial. Requiere solo conexiones de aire de entrada y salida, corriente eléctrica alterna, dos prefiltros y un postfiltro.
  
- Especificaciones
  - Capacidad máxima 1200 SCFM
  - Corriente eléctrica (volts/fases/Hertz) 460/3/60
  - Punto de rocío - 40 °C
  - Máxima temperatura del aire de entrada 48,9 °C
  - Conexiones tubería 76,2 mm (3 Pulg)
  - Presión máxima de operación 10,34 Bar (150 psi)
  
- Dimensiones y peso
  - Alto 2.84 m (112 Pulg)
  - Ancho 1.57 m (62 Pulg)
  - Fondo 1.22 m (48 Pulg)
  
- Filtros requeridos
  - Prefiltro marca Sullair Mod. SCF-1315

- Prefiltro marca Sullair Mod. SCH-1315
- Postfiltro marca Sullair Mod. SCR-1315
- Calidad de aire
  - Se tiene una calidad de aire para un extremadamente bajo punto de rocío (-40 °C), de acuerdo a la norma ISO 8573.1:
    - Clase 2 (partículas)
    - Clase 2 (agua)
    - Clase 1 (aceite)

### **3.2.5. Tubería**

Los requerimientos contenidos en las últimas ediciones y estándares mencionados abajo, serán parte integral de los requerimientos para la tubería del sistema de aire comprimido:

- ASME B31.3      Petroleum Refinery Piping
- AWS              American Welding Society
- ASNT             American Society for Nondestructive Testing

La fabricación, instalación, inspección y pruebas de la tubería de servicios estarán de acuerdo con ASME B31.3.

### 3.3. Procedimiento de revisión del cuarto de compresores

Tabla III. **Procedimiento de revisión del cuarto de compresores**

|  |
|--|
| Equipo de protección obligatorio   |
| Tapones de oído.   |
| Equipo de protección requerido   |
| Botas punta de acero   |
| Casco  |
| Lentes   |
| Mascarilla   |
| Cómo ingresar al cuarto de compresores   |
| Solicitar llave, la cual está en control central (solicitarla al jefe de control central que está de turno).                 |
| Al ingresar, revisar que el extractor de aire caliente se encuentre en operación (todos los cuartos cuentan con uno).        |
| En caso de baja presión de aire  |
| Revisar que todos los compresores estén arrancados.  |
| Revisar que todos los compresores estén en carga automática.   |
| Revisar que todos los compresores arrancados tengan la válvula de salida en posición abierta.                                |
| Revisar la presión de cada compresor y verificar que sea mayor a 90 psi (los compresores se encuentran en operación normal). |

Continuación tabla III.

|   |
|---|
| Revisar la presión en el acumulador húmedo, la cual debe ser mayor a 90 psi   |
| Revisar la presión en los manómetros del secador en la pantalla del mismo, la cual debe ser mayor a 90 psi.   |
| Revisar la presión en el acumulador seco, la cual debe de ser mayor a 90 psi.   |
| Si las condiciones anteriores se cumplen y la presión de los compresores es menor a 90 psi, existe un consumo real por parte del equipo de secado o los equipos que requieren aire comprimido, entonces se debe:  |
| Ver los ciclos de regeneración del secador, los secadores regenerativos realizan un ciclo de operación cada 5 minutos durante la regeneración en un minuto aproximado, se escucha el venteo suave a una presión de 19 psi en el manómetro central del secador, lo cual dice que está operando en forma correcta. En el caso que esta presión no se encuentre en este valor se deben abrir las válvulas correspondientes.  |
| Revisar la presión de salida del acumulador seco, debe ser mayor a 90 psi, si esta condición no se cumple, se debe abrir la válvula correcta para que la presión suba.<br><br>En este momento el sistema de tratamiento de aire comprimido se encuentra completamente <i>by pass</i> , por lo que no hay nada que restrinja el flujo de aire o que consuma aire para el sistema de tratamiento.<br><br>Si aun así la presión del acumulador seco no es mayor a 90 psi, hay un consumo real en la planta en la red de aire comprimido que debe ser verificado y corregido. |
| Apertura de válvulas de alivio  |
| Las válvulas de alivio de los compresores, el acumulador húmedo y el secador se encuentran calibradas a 125 psi. Si cualquiera de estas válvulas acciona se debe pasar a descarga manual a los compresores, iniciando por el que se escucha abierto en las válvulas de alivio.  |

Continuación tabla III.

|   |
|---|
| Compresor   |
| Cerrar las válvulas de salida del compresor y realizar la reparación de la válvula de alivio.                                 |
| Tanque húmedo   |
| Abrir la válvula correspondiente y cerrar las dos válvulas que correspondan y realizar la reparación de la válvula de alivio. |
| Tanque seco   |
| Abrir la válvula correspondiente y cerrar las dos válvulas que correspondan y realizar la reparación de la válvula de alivio. |
| Secador de aire   |
| Abrir la válvula correspondiente y cerrar las válvulas que correspondan y realizar la reparación de las válvulas de alivio.   |

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Rutinas de mantenimiento preventivo

#### 3.4.1. Compresor de aire tipo tornillo

Tabla IV. Inspecciones diarias

| <b>Diarias</b>  |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>  | <b>Cantidad de personas</b> |
| Verificación de presión   | 2                           |
| Verificación de temperatura   | 2                           |
| Chequeo de motores  | 2                           |
| Nivel del fluido del <i>carter</i>  | 2                           |
| Observar el funcionamiento correcto de los indicadores del tablero de mando | 2                           |
| Funcionamiento correcto del compresor                                       | 2                           |
| Verificación de agua en el aceite   | 2                           |
| Análisis de demanda de aire   | 2                           |
| Calidad de aire   | 2                           |
| Emisión de ruido  | 2                           |
| Consumo de energía eléctrica  | 2                           |
| Uso de lubricantes  | 2                           |
| Uso del aire comprimido   | 2                           |
| Emisión de sustancias destructoras de la capa de ozono                      | 2                           |
| Comprobación de vibraciones.  | 2                           |

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Inspecciones mensuales

| <b>Mensuales</b>                   |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                   | <b>Cantidad de personas</b> |
| Fugas de aire                      | 2                           |
| Fugas de aceite                    | 2                           |
| Revisión del filtro de aire        | 2                           |
| Análisis energético                | 2                           |
| Limpieza de los filtros de retorno | 2                           |

Continuación tabla V.

|   |   |
|---|---|
| Comprobación de purgas de agua                | 2 |
| Lubricación y engrase de cojinetes            | 2 |
| Reemplazar los elementos del filtro de fluido | 2 |
| Realizar una muestra del fluido.              | 2 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Inspecciones semestrales**

| <b>Semestrales</b>                                |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                                  | <b>Cantidad de personas</b> |
| Prueba de ferrografía                             | 3                           |
| Calibración de instrumentos                       | 2                           |
| Revisión del filtro de aceite                     | 2                           |
| Cambio de lubricante                              | 2                           |
| Cambio de sellos del filtro de fluido             | 3                           |
| Ajustes del diferencial del regulador de presión. | 3                           |
| Comprobación de parámetros eléctricos.            | 2                           |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Inspecciones anuales**

| <b>Anuales</b>                                      |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                                    | <b>Cantidad de personas</b> |
| Análisis de aceite                                  | 2                           |
| Chequeo de torque                                   | 3                           |
| Verificación y ajuste del acoplamiento y alineación | 3                           |
| Comprobación de cojinetes                           | 3                           |
| Comprobación del ventilador                         | 2                           |
| Revisión de la puesta en tierra                     | 2                           |
| Estado de pintura                                   | 2                           |
| Pruebas de arranque                                 | 3                           |

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. Separador aceite / agua

Tabla VIII. **Inspecciones diarias**

| <b>Diarias</b>              |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>            | <b>Cantidad de personas</b> |
| Verificación de presión     | 2                           |
| Verificación de temperatura | 2                           |
| Verificación vibraciones    | 2                           |
| Verificación de ruido       | 2                           |
| Descarga del agua limpia    | 2                           |

Fuente: elaboración propia

Tabla IX. **Inspecciones mensuales**

| <b>Mensuales</b>                                 |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                                 | <b>Cantidad de personas</b> |
| Verificación del tablero de mando                | 2                           |
| Revisión del separador aceite/agua               | 2                           |
| Verificación de que no existan taponeaduras      | 2                           |
| Verificar los purgadores de condensación         | 2                           |
| Revisión de la cámara de sedimentación primaria  | 3                           |
| Revisión del depósito principal de sedimentación | 3                           |
| Vaciar el contenedor externo de aceite           | 2                           |

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Inspecciones semestrales**

| <b>Semestrales</b>                |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                  | <b>Cantidad de personas</b> |
| Reemplazo del elemento separador  | 3                           |
| Cambio del cajetín filtrante      | 3                           |
| Cambio del cajetín principal      | 3                           |
| Cambio de cajetines del separador | 3                           |
| Verificar que no exista corrosión | 2                           |

Continuación tabla X.

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Revisión de conexiones eléctricas | 2 |
|-----------------------------------|---|

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.3. Secador de aire

Tabla XI. Inspecciones diarias

| Diarias   |                      |
|---|----------------------|
| Actividad   | Cantidad de personas |
| Revisión de indicadores del tablero de mando                              | 2                    |
| Análisis de demanda de aire   | 2                    |
| Comprobación de ruido   | 2                    |
| Comprobación de vibraciones   | 2                    |
| Inspección visual del equipo  | 2                    |
| Verificar los ajustes del equipo  | 2                    |
| Verificar presión   | 2                    |
| Revisar la presión de la purga de agua                                    | 2                    |
| Verificar secuencia adecuada de los tiempos de los silenciadores          | 2                    |
| Revisión del punto de rocío   | 2                    |
| Verificar que la configuración de la purga sea la adecuada                | 2                    |
| Verificar la temperatura adecuada del secador                             | 2                    |
| Verificar la temperatura adecuada del desecante                           | 2                    |
| Revisar que el flujo de aire del escape de purga sea el adecuado          | 2                    |
| Revisar las lecturas de los medidores                                     | 2                    |
| Revisar la secuencia de operación del secador a lo largo de todo el ciclo | 2                    |
| Revisar el funcionamiento del drenaje automático en el prefiltro          | 2                    |
| Revisar que no exista contrapresión en el tanque                          | 2                    |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Inspecciones mensuales**

| <b>Mensuales</b>  |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>  | <b>Cantidad de personas</b> |
| Visualizar que el desecante se encuentre completamente seco | 2                           |
| Fugas de aire   | 3                           |
| Análisis energético   | 3                           |
| Verificar que no exista obstrucción en las válvulas         | 2                           |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Inspecciones semestrales**

| <b>Semestrales</b>          |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>            | <b>Cantidad de personas</b> |
| Calibración de instrumentos | 3                           |
| Reemplazo de fusibles       | 3                           |
| Cambio de silenciador       | 3                           |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Inspecciones anuales**

| <b>Anuales</b>                        |                             |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Actividad</b>                      | <b>Cantidad de personas</b> |
| Cambio de desecante                   | 3                           |
| Reemplazo de filtro de aire piloto    | 3                           |
| Verificación de puesta en tierra      | 2                           |
| Verificar estado de la pintura        | 2                           |
| Comprobación de parámetros eléctricos | 3                           |
| Pruebas de arranque                   | 3                           |
| Cambio de sellos                      | 3                           |

Fuente: elaboración propia.



## **4. AHORRO ENERGÉTICO**

Se debe tomar en cuenta uno de los temas más importantes en la actualidad: el medio ambiente, debido a que en los últimos años el impacto ambiental ha sido uno de los problemas más grandes de la humanidad, provocando un cambio climático mundial de consecuencias muy negativas.

El uso de la energía eléctrica es una de las principales causas de las emisiones de gases de efecto invernadero, produciendo un cambio climático. Una de las formas de impedir las consecuencias ambientales, sociales y económicas, relacionadas con el aumento de temperatura y la subida del nivel de mar, consiste en reducir el consumo de energía eléctrica.

### **4.1. Medición de valores de los compresores**

Como parte del ejercicio profesional supervisado se realizó un estudio y un análisis del consumo eléctrico, específicamente en el sistema de aire comprimido del área de trituración, que incluye dos compresores de 150 hp, los cuales son los encargados de entregar el aire comprimido en dicha área de la planta. A continuación se mostrarán los datos recabados durante el período de una semana, la cual fue del lunes 19 de junio al domingo 25 de junio del año 2017. Se obtuvo el promedio de las presiones y las potencias obtenidas, para así poder realizar el análisis energético y graficar los resultados. Con estos datos se puede pronosticar cuál será el comportamiento de los compresores durante el año, para así poder proyectar a 50 semanas de trabajo con los datos medidos.

Tabla XV. Datos recabados durante la semana de trabajo

| Lunes 19 de junio de 2017 |             |       |             |       |
|---------------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Hora                      | Compresor 1 |       | Compresor 2 |       |
|                           | Presión psi | kW    | Presión psi | kW    |
| 7:00:00 a. m.             | 114         | 16.05 | 113         | 16.10 |
| 7:10:00 a. m.             | 113         | 16.10 | 115         | 16.09 |
| 7:20:00 a. m.             | 113         | 16.04 | 117         | 16.13 |
| 7:30:00 a. m.             | 112         | 16.06 | 116         | 16.15 |
| 7:40:00 a. m.             | 114         | 16.10 | 110         | 16.13 |
| 7:50:00 a. m.             | 115         | 16.13 | 118         | 16.12 |
| 8:00:00 a. m.             | 117         | 16.10 | 115         | 16.14 |
| 8:10:00 a. m.             | 116         | 16.12 | 112         | 16.13 |
| 8:20:00 a. m.             | 118         | 16.15 | 119         | 16.09 |
| 8:30:00 a. m.             | 115         | 16.13 | 120         | 16.15 |
| 8:40:00 a. m.             | 115         | 16.12 | 114         | 16.13 |
| 8:50:00 a. m.             | 114         | 16.14 | 117         | 16.12 |
| 9:00:00 a. m.             | 113         | 16.12 | 114         | 16.14 |
| 9:10:00 a. m.             | 113         | 16.10 | 113         | 16.12 |
| 9:20:00 a. m.             | 111         | 16.02 | 116         | 16.10 |
| 9:30:00 a. m.             | 110         | 16.00 | 118         | 16.09 |
| 9:40:00 a. m.             | 113         | 15.99 | 115         | 16.15 |
| 9:50:00 a. m.             | 110         | 15.97 | 116         | 16.13 |
| 10:00:00 a. m.            | 115         | 17.51 | 104         | 15.70 |
| 10:10:00 a. m.            | 114         | 17.50 | 107         | 15.75 |
| 10:20:00 a. m.            | 118         | 17.55 | 105         | 15.75 |
| 10:30:00 a. m.            | 120         | 17.54 | 103         | 15.73 |
| 10:40:00 a. m.            | 117         | 17.56 | 106         | 15.78 |
| 10:50:00 a. m.            | 117         | 17.53 | 108         | 15.75 |
| 11:00:00 a. m.            | 116         | 17.57 | 107         | 15.76 |
| 11:10:00 a. m.            | 118         | 17.55 | 106         | 15.75 |
| 11:20:00 a. m.            | 114         | 17.50 | 107         | 15.73 |
| 11:30:00 a. m.            | 117         | 17.55 | 106         | 15.76 |
| 11:40:00 a. m.            | 119         | 17.53 | 107         | 15.78 |
| 11:50:00 a. m.            | 120         | 17.54 | 107         | 15.76 |
| 12:00:00 p. m.            | 117         | 17.53 | 105         | 15.77 |
| 12:10:00 p. m.            | 112         | 16.14 | 108         | 15.80 |
| 12:20:00 p. m.            | 115         | 16.15 | 110         | 15.80 |
| 12:30:00 p. m.            | 114         | 16.13 | 109         | 15.84 |
| 12:40:00 p. m.            | 117         | 16.17 | 107         | 15.81 |
| 12:50:00 p. m.            | 113         | 16.14 | 111         | 15.80 |

Continuación tabla XV.

|                                   |     |       |     |       |
|-----------------------------------|-----|-------|-----|-------|
| 1:00:00 p. m.                     | 112 | 16.15 | 114 | 15.82 |
| 1:10:00 p. m.                     | 105 | 15.76 | 115 | 17.50 |
| 1:20:00 p. m.                     | 108 | 15.78 | 118 | 17.56 |
| 1:30:00 p. m.                     | 103 | 15.80 | 114 | 17.57 |
| 1:40:00 p. m.                     | 107 | 15.75 | 115 | 17.59 |
| 1:50:00 p. m.                     | 107 | 15.79 | 117 | 17.55 |
| 2:00:00 p. m.                     | 102 | 15.81 | 116 | 17.54 |
| 2:10:00 p. m.                     | 104 | 15.78 | 114 | 17.59 |
| 2:20:00 p. m.                     | 108 | 15.74 | 113 | 17.60 |
| 2:30:00 p. m.                     | 105 | 15.77 | 117 | 17.57 |
| 2:40:00 p. m.                     | 103 | 15.75 | 121 | 17.74 |
| 2:50:00 p. m.                     | 105 | 15.76 | 114 | 17.59 |
| 3:00:00 p. m.                     | 107 | 15.78 | 117 | 17.60 |
| 3:10:00 p. m.                     | 116 | 17.63 | 103 | 15.70 |
| 3:20:00 p. m.                     | 119 | 17.59 | 106 | 15.75 |
| 3:30:00 p. m.                     | 118 | 17.65 | 104 | 15.77 |
| 3:40:00 p. m.                     | 115 | 17.64 | 105 | 15.70 |
| 3:50:00 p. m.                     | 117 | 17.66 | 107 | 15.74 |
| 4:00:00 p. m.                     | 118 | 17.64 | 103 | 15.74 |
| <b>Martes 20 de junio de 2017</b> |     |       |     |       |
| 7:00:00 a. m.                     | 116 | 16.19 | 117 | 16.12 |
| 7:10:00 a. m.                     | 117 | 16.14 | 114 | 16.17 |
| 7:20:00 a. m.                     | 117 | 16.10 | 115 | 16.11 |
| 7:30:00 a. m.                     | 118 | 16.11 | 114 | 16.09 |
| 7:40:00 a. m.                     | 116 | 16.13 | 120 | 16.14 |
| 7:50:00 a. m.                     | 114 | 16.15 | 112 | 16.13 |
| 8:00:00 a. m.                     | 113 | 16.14 | 110 | 16.10 |
| 8:10:00 a. m.                     | 114 | 16.08 | 115 | 16.16 |
| 8:20:00 a. m.                     | 112 | 16.09 | 116 | 16.15 |
| 8:30:00 a. m.                     | 113 | 16.12 | 114 | 16.14 |
| 8:40:00 a. m.                     | 113 | 16.14 | 120 | 16.11 |
| 8:50:00 a. m.                     | 116 | 16.10 | 113 | 16.09 |
| 9:00:00 a. m.                     | 117 | 16.10 | 116 | 16.11 |
| 9:10:00 a. m.                     | 115 | 16.00 | 117 | 16.13 |
| 9:20:00 a. m.                     | 112 | 15.98 | 114 | 16.14 |
| 9:30:00 a. m.                     | 114 | 16.03 | 112 | 16.15 |
| 9:40:00 a. m.                     | 112 | 16.01 | 114 | 16.09 |
| 9:50:00 a. m.                     | 113 | 16.00 | 114 | 16.11 |
| 10:00:00 a. m.                    | 116 | 17.53 | 106 | 15.74 |
| 10:10:00 a. m.                    | 115 | 17.60 | 103 | 15.77 |
| 10:20:00 a. m.                    | 118 | 17.54 | 102 | 15.76 |

Continuación tabla XV.

|                                      |     |       |     |       |
|--------------------------------------|-----|-------|-----|-------|
| 10:30:00 a. m.                       | 117 | 17.58 | 107 | 15.79 |
| 10:40:00 a. m.                       | 115 | 17.55 | 105 | 15.75 |
| 10:50:00 a. m.                       | 113 | 17.61 | 102 | 15.80 |
| 11:00:00 a. m.                       | 118 | 17.55 | 103 | 15.76 |
| 11:10:00 a. m.                       | 117 | 17.59 | 107 | 15.74 |
| 11:20:00 a. m.                       | 120 | 17.56 | 103 | 15.79 |
| 11:30:00 a. m.                       | 118 | 17.53 | 104 | 15.75 |
| 11:40:00 a. m.                       | 116 | 17.57 | 103 | 15.77 |
| 11:50:00 a. m.                       | 117 | 17.52 | 105 | 15.78 |
| 12:00:00 p. m.                       | 119 | 17.57 | 104 | 15.72 |
| 12:10:00 p. m.                       | 115 | 16.15 | 110 | 15.84 |
| 12:20:00 p. m.                       | 113 | 16.11 | 108 | 15.88 |
| 12:30:00 p. m.                       | 117 | 16.14 | 111 | 15.80 |
| 12:40:00 p. m.                       | 114 | 16.15 | 109 | 15.83 |
| 12:50:00 p. m.                       | 116 | 16.16 | 107 | 15.86 |
| 1:00:00 p. m.                        | 111 | 16.11 | 111 | 15.86 |
| 1:10:00 p. m.                        | 102 | 15.75 | 117 | 17.61 |
| 1:20:00 p. m.                        | 105 | 15.77 | 116 | 17.58 |
| 1:30:00 p. m.                        | 107 | 15.78 | 120 | 17.59 |
| 1:40:00 p. m.                        | 103 | 15.79 | 116 | 17.58 |
| 1:50:00 p. m.                        | 103 | 15.78 | 119 | 17.63 |
| 2:00:00 p. m.                        | 108 | 15.77 | 118 | 17.58 |
| 2:10:00 p. m.                        | 106 | 15.77 | 117 | 17.61 |
| 2:20:00 p. m.                        | 105 | 15.78 | 115 | 17.62 |
| 2:30:00 p. m.                        | 102 | 15.76 | 116 | 17.59 |
| 2:40:00 p. m.                        | 104 | 15.79 | 119 | 17.70 |
| 2:50:00 p. m.                        | 104 | 15.78 | 118 | 17.61 |
| 3:00:00 p. m.                        | 103 | 15.77 | 116 | 17.58 |
| 3:10:00 p. m.                        | 118 | 17.60 | 105 | 15.75 |
| 3:20:00 p. m.                        | 121 | 17.61 | 104 | 15.77 |
| 3:30:00 p. m.                        | 116 | 17.64 | 103 | 15.79 |
| 3:40:00 p. m.                        | 120 | 17.68 | 102 | 15.84 |
| 3:50:00 p. m.                        | 119 | 17.62 | 105 | 15.80 |
| 4:00:00 p. m.                        | 120 | 17.66 | 105 | 15.76 |
| <b>Miércoles 21 de junio de 2017</b> |     |       |     |       |
| 7:00:00 a. m.                        | 113 | 16.12 | 115 | 16.14 |
| 7:10:00 a. m.                        | 115 | 16.11 | 116 | 16.13 |
| 7:20:00 a. m.                        | 115 | 16.18 | 113 | 16.14 |
| 7:30:00 a. m.                        | 114 | 16.12 | 115 | 16.16 |
| 7:40:00 a. m.                        | 115 | 16.16 | 114 | 16.16 |
| 7:50:00 a. m.                        | 116 | 16.14 | 116 | 16.11 |

Continuación tabla XV.

|                |     |       |     |       |
|----------------|-----|-------|-----|-------|
| 8:00:00 a. m.  | 115 | 16.12 | 120 | 16.09 |
| 8:10:00 a. m.  | 117 | 16.16 | 118 | 16.14 |
| 8:20:00 a. m.  | 115 | 16.11 | 115 | 16.19 |
| 8:30:00 a. m.  | 114 | 16.11 | 116 | 16.16 |
| 8:40:00 a. m.  | 112 | 16.10 | 115 | 16.15 |
| 8:50:00 a. m.  | 114 | 16.13 | 115 | 16.14 |
| 9:00:00 a. m.  | 116 | 16.11 | 117 | 16.13 |
| 9:10:00 a. m.  | 112 | 16.05 | 115 | 16.11 |
| 9:20:00 a. m.  | 113 | 16.00 | 120 | 16.11 |
| 9:30:00 a. m.  | 116 | 15.97 | 116 | 16.10 |
| 9:40:00 a. m.  | 114 | 16.03 | 116 | 16.12 |
| 9:50:00 a. m.  | 116 | 16.01 | 115 | 16.16 |
| 10:00:00 a. m. | 117 | 17.52 | 105 | 15.75 |
| 10:10:00 a. m. | 117 | 17.55 | 104 | 15.73 |
| 10:20:00 a. m. | 115 | 17.56 | 108 | 15.77 |
| 10:30:00 a. m. | 116 | 17.55 | 105 | 15.75 |
| 10:40:00 a. m. | 119 | 17.57 | 107 | 15.72 |
| 10:50:00 a. m. | 115 | 17.56 | 105 | 15.74 |
| 11:00:00 a. m. | 115 | 17.59 | 106 | 15.75 |
| 11:10:00 a. m. | 116 | 17.57 | 105 | 15.77 |
| 11:20:00 a. m. | 117 | 17.53 | 108 | 15.76 |
| 11:30:00 a. m. | 116 | 17.52 | 102 | 15.77 |
| 11:40:00 a. m. | 118 | 17.55 | 105 | 15.76 |
| 11:50:00 a. m. | 114 | 17.53 | 103 | 15.77 |
| 12:00:00 p. m. | 115 | 17.55 | 106 | 15.82 |
| 12:10:00 p. m. | 116 | 16.13 | 109 | 15.82 |
| 12:20:00 p. m. | 114 | 16.12 | 105 | 15.86 |
| 12:30:00 p. m. | 111 | 16.12 | 107 | 15.82 |
| 12:40:00 p. m. | 115 | 16.19 | 104 | 15.82 |
| 12:50:00 p. m. | 112 | 16.15 | 109 | 15.83 |
| 1:00:00 p. m.  | 116 | 16.13 | 104 | 15.84 |
| 1:10:00 p. m.  | 108 | 15.77 | 119 | 17.56 |
| 1:20:00 p. m.  | 102 | 15.79 | 115 | 17.57 |
| 1:30:00 p. m.  | 105 | 15.79 | 118 | 17.60 |
| 1:40:00 p. m.  | 104 | 15.77 | 118 | 17.60 |
| 1:50:00 p. m.  | 106 | 15.80 | 121 | 17.59 |
| 2:00:00 p. m.  | 103 | 15.80 | 120 | 17.56 |
| 2:10:00 p. m.  | 105 | 15.79 | 120 | 17.60 |
| 2:20:00 p. m.  | 102 | 15.76 | 121 | 17.61 |
| 2:30:00 p. m.  | 108 | 15.78 | 118 | 17.58 |
| 2:40:00 p. m.  | 105 | 15.78 | 117 | 17.46 |

Continuación tabla XV.

|                                   |     |       |     |       |
|-----------------------------------|-----|-------|-----|-------|
| 2:50:00 p. m.                     | 106 | 15.77 | 120 | 17.60 |
| 3:00:00 p. m.                     | 105 | 15.79 | 118 | 17.62 |
| 3:10:00 p. m.                     | 120 | 17.66 | 107 | 15.76 |
| 3:20:00 p. m.                     | 118 | 17.60 | 105 | 15.79 |
| 3:30:00 p. m.                     | 117 | 17.66 | 105 | 15.75 |
| 3:40:00 p. m.                     | 121 | 17.65 | 108 | 15.78 |
| 3:50:00 p. m.                     | 115 | 17.64 | 103 | 15.76 |
| 4:00:00 p. m.                     | 117 | 17.66 | 107 | 15.78 |
| <b>Jueves 22 de junio de 2017</b> |     |       |     |       |
| 7:00:00 a. m.                     | 115 | 16.10 | 114 | 16.11 |
| 7:10:00 a. m.                     | 112 | 16.12 | 112 | 16.12 |
| 7:20:00 a. m.                     | 114 | 16.12 | 114 | 16.12 |
| 7:30:00 a. m.                     | 116 | 16.18 | 117 | 16.08 |
| 7:40:00 a. m.                     | 113 | 16.15 | 116 | 16.12 |
| 7:50:00 a. m.                     | 112 | 16.13 | 114 | 16.15 |
| 8:00:00 a. m.                     | 114 | 16.09 | 114 | 16.18 |
| 8:10:00 a. m.                     | 113 | 16.11 | 111 | 16.12 |
| 8:20:00 a. m.                     | 114 | 16.13 | 111 | 16.14 |
| 8:30:00 a. m.                     | 117 | 16.14 | 115 | 16.13 |
| 8:40:00 a. m.                     | 117 | 16.15 | 110 | 16.12 |
| 8:50:00 a. m.                     | 115 | 16.12 | 112 | 16.10 |
| 9:00:00 a. m.                     | 114 | 16.13 | 113 | 16.12 |
| 9:10:00 a. m.                     | 116 | 16.04 | 114 | 16.09 |
| 9:20:00 a. m.                     | 114 | 15.99 | 110 | 16.12 |
| 9:30:00 a. m.                     | 112 | 15.98 | 114 | 16.14 |
| 9:40:00 a. m.                     | 116 | 16.00 | 112 | 16.14 |
| 9:50:00 a. m.                     | 114 | 15.98 | 117 | 16.08 |
| 10:00:00 a. m.                    | 118 | 17.50 | 107 | 15.76 |
| 10:10:00 a. m.                    | 120 | 17.54 | 106 | 15.74 |
| 10:20:00 a. m.                    | 117 | 17.53 | 109 | 15.78 |
| 10:30:00 a. m.                    | 118 | 17.57 | 104 | 15.76 |
| 10:40:00 a. m.                    | 116 | 17.53 | 103 | 15.74 |
| 10:50:00 a. m.                    | 121 | 17.58 | 103 | 15.76 |
| 11:00:00 a. m.                    | 117 | 17.56 | 104 | 15.73 |
| 11:10:00 a. m.                    | 119 | 17.58 | 104 | 15.78 |
| 11:20:00 a. m.                    | 114 | 17.52 | 102 | 15.72 |
| 11:30:00 a. m.                    | 115 | 17.56 | 105 | 15.78 |
| 11:40:00 a. m.                    | 117 | 17.54 | 106 | 15.75 |
| 11:50:00 a. m.                    | 116 | 17.55 | 108 | 15.76 |
| 12:00:00 p. m.                    | 118 | 17.54 | 107 | 15.74 |
| 12:10:00 p. m.                    | 114 | 16.16 | 111 | 15.81 |

Continuación tabla XV.

|                                    |     |       |     |       |
|------------------------------------|-----|-------|-----|-------|
| 12:20:00 p. m.                     | 112 | 16.14 | 113 | 15.82 |
| 12:30:00 p. m.                     | 112 | 16.11 | 106 | 15.85 |
| 12:40:00 p. m.                     | 111 | 16.18 | 111 | 15.84 |
| 12:50:00 p. m.                     | 115 | 16.17 | 108 | 15.85 |
| 1:00:00 p. m.                      | 114 | 16.14 | 109 | 15.83 |
| 1:10:00 p. m.                      | 104 | 15.74 | 116 | 17.55 |
| 1:20:00 p. m.                      | 106 | 15.79 | 117 | 17.55 |
| 1:30:00 p. m.                      | 102 | 15.77 | 116 | 17.56 |
| 1:40:00 p. m.                      | 105 | 15.78 | 119 | 17.61 |
| 1:50:00 p. m.                      | 104 | 15.77 | 115 | 17.58 |
| 2:00:00 p. m.                      | 105 | 15.78 | 114 | 17.60 |
| 2:10:00 p. m.                      | 103 | 15.80 | 116 | 17.62 |
| 2:20:00 p. m.                      | 104 | 15.75 | 119 | 17.59 |
| 2:30:00 p. m.                      | 103 | 15.79 | 121 | 17.60 |
| 2:40:00 p. m.                      | 107 | 15.76 | 113 | 17.50 |
| 2:50:00 p. m.                      | 103 | 15.73 | 116 | 17.61 |
| 3:00:00 p. m.                      | 102 | 15.80 | 120 | 17.59 |
| 3:10:00 p. m.                      | 117 | 17.62 | 108 | 15.77 |
| 3:20:00 p. m.                      | 117 | 17.61 | 103 | 15.76 |
| 3:30:00 p. m.                      | 120 | 17.67 | 106 | 15.78 |
| 3:40:00 p. m.                      | 116 | 17.67 | 107 | 15.77 |
| 3:50:00 p. m.                      | 118 | 17.65 | 108 | 15.78 |
| 4:00:00 p. m.                      | 116 | 17.64 | 104 | 15.77 |
| <b>Viernes 23 de junio de 2017</b> |     |       |     |       |
| 7:00:00 a. m.                      | 117 | 16.14 | 116 | 16.13 |
| 7:10:00 a. m.                      | 118 | 16.09 | 118 | 16.14 |
| 7:20:00 a. m.                      | 116 | 16.11 | 116 | 16.10 |
| 7:30:00 a. m.                      | 115 | 16.13 | 113 | 16.12 |
| 7:40:00 a. m.                      | 117 | 16.11 | 115 | 16.15 |
| 7:50:00 a. m.                      | 118 | 16.15 | 115 | 16.14 |
| 8:00:00 a. m.                      | 116 | 16.15 | 116 | 16.19 |
| 8:10:00 a. m.                      | 115 | 16.13 | 119 | 16.15 |
| 8:20:00 a. m.                      | 116 | 16.12 | 114 | 16.13 |
| 8:30:00 a. m.                      | 116 | 16.10 | 110 | 16.12 |
| 8:40:00 a. m.                      | 118 | 16.09 | 116 | 16.09 |
| 8:50:00 a. m.                      | 116 | 16.11 | 118 | 16.15 |
| 9:00:00 a. m.                      | 115 | 16.09 | 115 | 16.10 |
| 9:10:00 a. m.                      | 114 | 16.06 | 116 | 16.15 |
| 9:20:00 a. m.                      | 115 | 16.01 | 115 | 16.13 |
| 9:30:00 a. m.                      | 113 | 16.02 | 115 | 16.12 |
| 9:40:00 a. m.                      | 110 | 15.97 | 118 | 16.10 |

Continuación tabla XV.

|                              |     |       |     |       |
|------------------------------|-----|-------|-----|-------|
| 9:50:00 a. m.                | 112 | 15.99 | 113 | 16.12 |
| 10:00:00 a. m.               | 119 | 17.54 | 103 | 15.80 |
| 10:10:00 a. m.               | 119 | 17.56 | 105 | 15.76 |
| 10:20:00 a. m.               | 115 | 17.57 | 101 | 15.74 |
| 10:30:00 a. m.               | 114 | 17.56 | 106 | 15.77 |
| 10:40:00 a. m.               | 118 | 17.59 | 104 | 15.76 |
| 10:50:00 a. m.               | 119 | 17.57 | 107 | 15.70 |
| 11:00:00 a. m.               | 119 | 17.58 | 105 | 15.77 |
| 11:10:00 a. m.               | 115 | 17.56 | 103 | 15.76 |
| 11:20:00 a. m.               | 116 | 17.54 | 105 | 15.80 |
| 11:30:00 a. m.               | 119 | 17.54 | 108 | 15.74 |
| 11:40:00 a. m.               | 115 | 17.56 | 104 | 15.79 |
| 11:50:00 a. m.               | 118 | 17.51 | 102 | 15.78 |
| 12:00:00 p. m.               | 116 | 17.56 | 103 | 15.80 |
| 12:10:00 p. m.               | 113 | 16.12 | 107 | 15.83 |
| 12:20:00 p. m.               | 116 | 16.13 | 109 | 15.84 |
| 12:30:00 p. m.               | 116 | 16.15 | 112 | 15.79 |
| 12:40:00 p. m.               | 113 | 16.16 | 114 | 15.80 |
| 12:50:00 p. m.               | 114 | 16.13 | 110 | 15.80 |
| 1:00:00 p. m.                | 117 | 16.12 | 107 | 15.85 |
| 1:10:00 p. m.                | 106 | 15.78 | 118 | 17.57 |
| 1:20:00 p. m.                | 104 | 15.77 | 119 | 17.59 |
| 1:30:00 p. m.                | 108 | 15.81 | 117 | 17.58 |
| 1:40:00 p. m.                | 106 | 15.76 | 117 | 17.56 |
| 1:50:00 p. m.                | 105 | 15.81 | 113 | 17.60 |
| 2:00:00 p. m.                | 107 | 15.79 | 117 | 17.52 |
| 2:10:00 p. m.                | 107 | 15.76 | 118 | 17.58 |
| 2:20:00 p. m.                | 106 | 15.77 | 117 | 17.63 |
| 2:30:00 p. m.                | 107 | 15.75 | 113 | 17.56 |
| 2:40:00 p. m.                | 106 | 15.77 | 115 | 17.60 |
| 2:50:00 p. m.                | 107 | 15.81 | 117 | 17.59 |
| 3:00:00 p. m.                | 108 | 15.76 | 114 | 17.61 |
| 3:10:00 p. m.                | 119 | 17.64 | 102 | 15.82 |
| 3:20:00 p. m.                | 115 | 17.59 | 107 | 15.78 |
| 3:30:00 p. m.                | 119 | 17.63 | 107 | 15.76 |
| 3:40:00 p. m.                | 118 | 17.66 | 103 | 15.76 |
| 3:50:00 p. m.                | 121 | 17.63 | 102 | 15.77 |
| 4:00:00 p. m.                | 119 | 17.65 | 106 | 15.75 |
| Sábado 24 de junio de 2017   |     |       |     |       |
| No se realizaron mediciones. |     |       |     |       |

Continuación tabla XV.

| Domingo 25 de junio de 2017  |  |
|------------------------------|--|
| No se realizaron mediciones. |  |

Fuente: elaboración propia.

La programación establecida de los dos compresores consiste en que uno trabaja a presiones relativamente altas y el otro a presiones bajas, intercalando la manera de funcionamiento. Y así se logra evitar que trabajen a su máxima capacidad, prolongando el tiempo de vida de cada uno de los equipos y evitando un sobrecalentamiento de sus componentes. Para realizar el análisis energético, y con la ayuda de las mediciones obtenidas en la semana de trabajo, se puede decir que así trabajarán los compresores durante un año y en eso consiste la proyección: poder pronosticar el comportamiento de los equipos, con el mismo consumo eléctrico durante las siguientes semanas, logrando mantener la presión dentro del sistema de aire comprimido. Para facilidad de manejo de datos se obtuvo el promedio que se muestra a continuación.

Tabla XVI. **Promedio de mediciones obtenidas del compresor 1**

| COMPRESOR 1   |             |       |
|---------------|-------------|-------|
| Hora          | Presión psi | kW    |
| 7:00:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 7:10:00 a. m. | 115         | 16.11 |
| 7:20:00 a. m. | 115         | 16.11 |
| 7:30:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 7:40:00 a. m. | 115         | 16.13 |
| 7:50:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 8:00:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 8:10:00 a. m. | 115         | 16.12 |

Continuación tabla XVI.

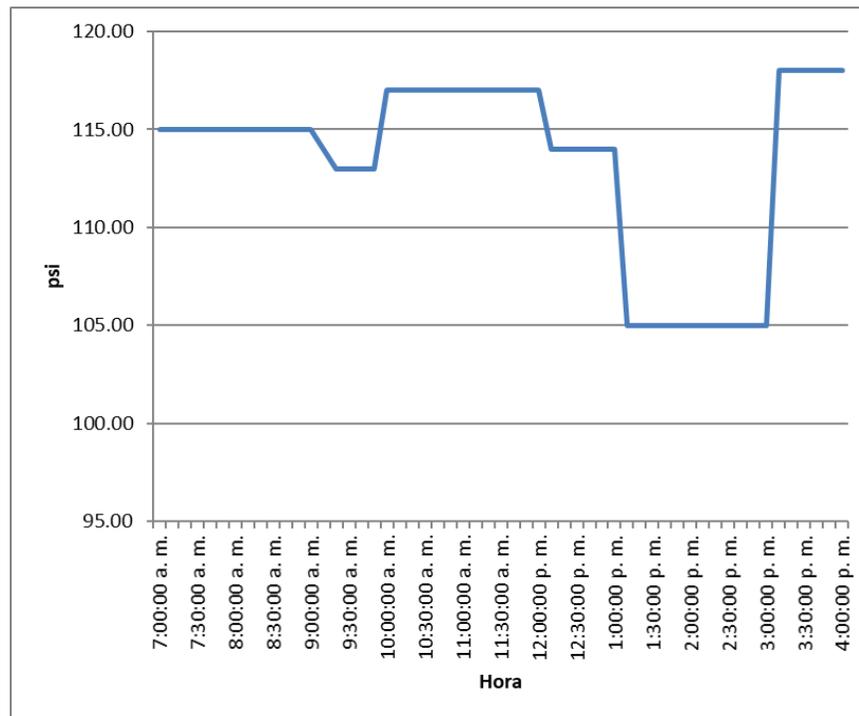
|                |     |       |
|----------------|-----|-------|
| 8:20:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 8:30:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 8:40:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 8:50:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:00:00 a. m.  | 115 | 16.11 |
| 9:10:00 a. m.  | 114 | 16.05 |
| 9:20:00 a. m.  | 113 | 16.00 |
| 9:30:00 a. m.  | 113 | 16.00 |
| 9:40:00 a. m.  | 113 | 16.00 |
| 9:50:00 a. m.  | 113 | 15.99 |
| 10:00:00 a. m. | 117 | 17.52 |
| 10:10:00 a. m. | 117 | 17.55 |
| 10:20:00 a. m. | 117 | 17.55 |
| 10:30:00 a. m. | 117 | 17.56 |
| 10:40:00 a. m. | 117 | 17.56 |
| 10:50:00 a. m. | 117 | 17.57 |
| 11:00:00 a. m. | 117 | 17.57 |
| 11:10:00 a. m. | 117 | 17.57 |
| 11:20:00 a. m. | 117 | 17.53 |
| 11:30:00 a. m. | 117 | 17.54 |
| 11:40:00 a. m. | 117 | 17.55 |
| 11:50:00 a. m. | 117 | 17.53 |
| 12:00:00 p. m. | 117 | 17.55 |
| 12:10:00 p. m. | 114 | 16.14 |
| 12:20:00 p. m. | 114 | 16.13 |
| 12:30:00 p. m. | 114 | 16.13 |
| 12:40:00 p. m. | 114 | 16.17 |
| 12:50:00 p. m. | 114 | 16.15 |
| 1:00:00 p. m.  | 114 | 16.13 |
| 1:10:00 p. m.  | 105 | 15.76 |
| 1:20:00 p. m.  | 105 | 15.78 |
| 1:30:00 p. m.  | 105 | 15.79 |
| 1:40:00 p. m.  | 105 | 15.77 |
| 1:50:00 p. m.  | 105 | 15.79 |
| 2:00:00 p. m.  | 105 | 15.79 |

Continuación tabla XVI.

|               |     |       |
|---------------|-----|-------|
| 2:10:00 p. m. | 105 | 15.78 |
| 2:20:00 p. m. | 105 | 15.76 |
| 2:30:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 2:40:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 2:50:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 3:00:00 p. m. | 105 | 15.78 |
| 3:10:00 p. m. | 118 | 17.63 |
| 3:20:00 p. m. | 118 | 17.6  |
| 3:30:00 p. m. | 118 | 17.65 |
| 3:40:00 p. m. | 118 | 17.66 |
| 3:50:00 p. m. | 118 | 17.64 |
| 4:00:00 p. m. | 118 | 17.65 |

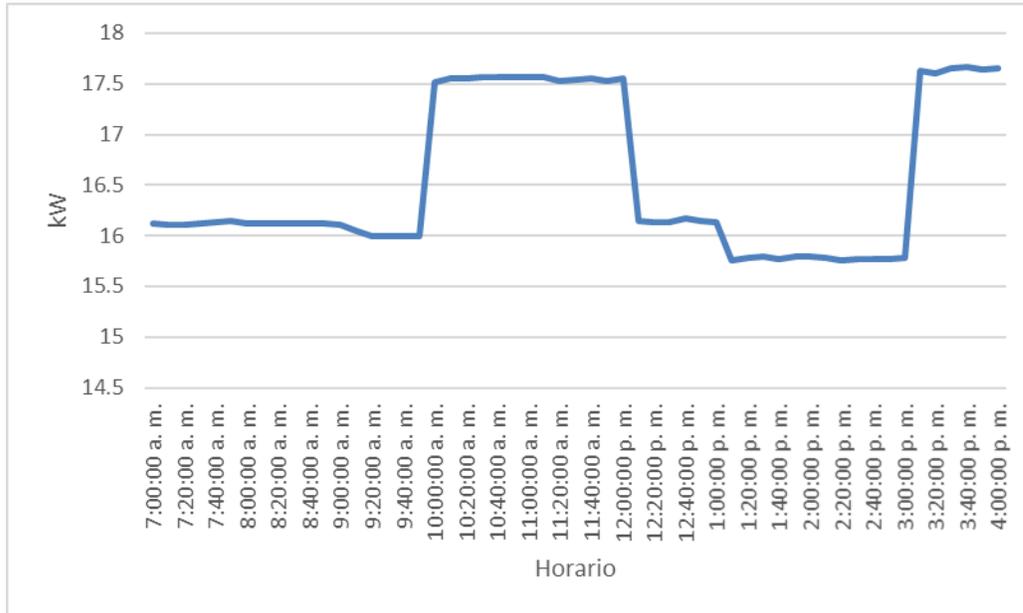
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfica del comportamiento de presiones del compresor 1**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Gráfica del comportamiento de potencias del compresor 1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Datos del compresor 2**

| COMPRESOR 2   |             |       |
|---------------|-------------|-------|
| Hora          | Presión psi | kW    |
| 7:00:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 7:10:00 a. m. | 115         | 16.13 |
| 7:20:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 7:30:00 a. m. | 115         | 16.12 |
| 7:40:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 7:50:00 a. m. | 115         | 16.13 |
| 8:00:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 8:10:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 8:20:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 8:30:00 a. m. | 115         | 16.14 |
| 8:40:00 a. m. | 115         | 16.12 |

Continuación tabla XVII.

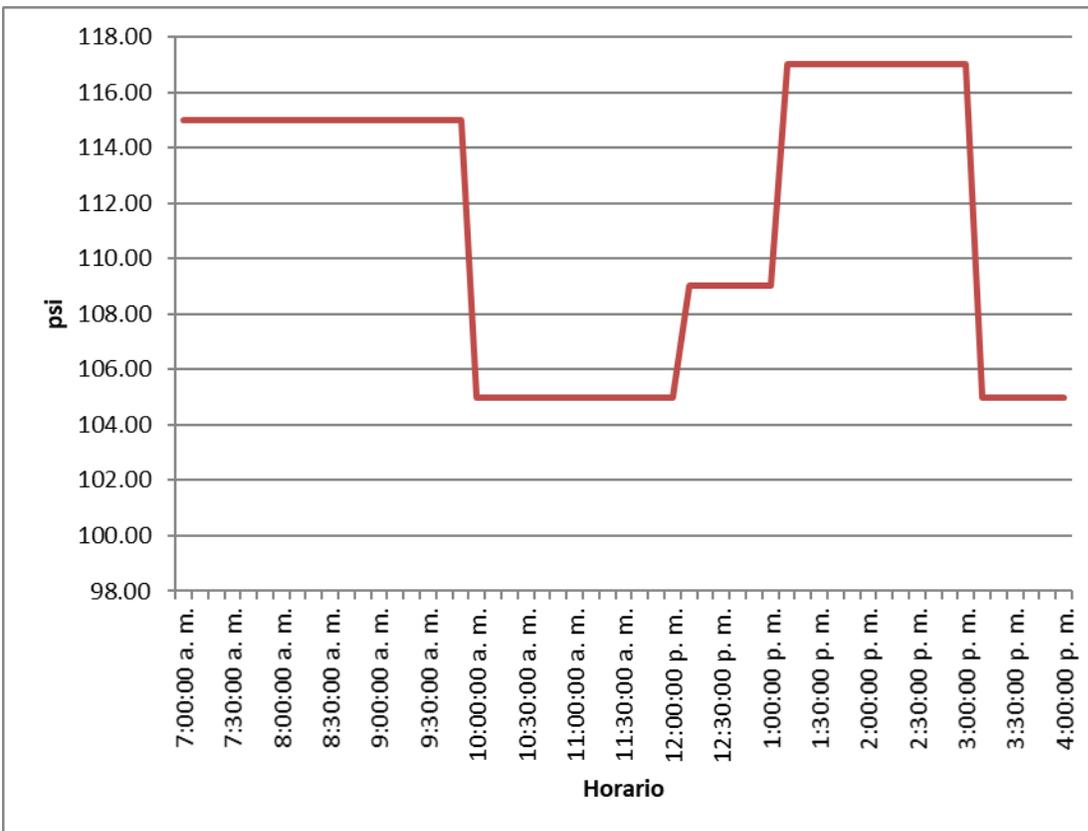
|                |     |       |
|----------------|-----|-------|
| 8:50:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:00:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:10:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:20:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:30:00 a. m.  | 115 | 16.12 |
| 9:40:00 a. m.  | 115 | 16.14 |
| 9:50:00 a. m.  | 115 | 16.14 |
| 10:00:00 a. m. | 105 | 15.75 |
| 10:10:00 a. m. | 105 | 15.75 |
| 10:20:00 a. m. | 105 | 15.76 |
| 10:30:00 a. m. | 105 | 15.76 |
| 10:40:00 a. m. | 105 | 15.75 |
| 10:50:00 a. m. | 105 | 15.75 |
| 11:00:00 a. m. | 105 | 15.75 |
| 11:10:00 a. m. | 105 | 15.76 |
| 11:20:00 a. m. | 105 | 15.76 |
| 11:30:00 a. m. | 105 | 15.76 |
| 11:40:00 a. m. | 105 | 15.77 |
| 11:50:00 a. m. | 105 | 15.77 |
| 12:00:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 12:10:00 p. m. | 109 | 15.82 |
| 12:20:00 p. m. | 109 | 15.84 |
| 12:30:00 p. m. | 109 | 15.82 |
| 12:40:00 p. m. | 109 | 15.82 |
| 12:50:00 p. m. | 109 | 15.83 |
| 1:00:00 p. m.  | 109 | 15.84 |
| 1:10:00 p. m.  | 117 | 17.56 |
| 1:20:00 p. m.  | 117 | 17.57 |
| 1:30:00 p. m.  | 117 | 17.58 |
| 1:40:00 p. m.  | 117 | 17.59 |
| 1:50:00 p. m.  | 117 | 17.59 |
| 2:00:00 p. m.  | 117 | 17.56 |
| 2:10:00 p. m.  | 117 | 17.60 |
| 2:20:00 p. m.  | 117 | 17.61 |
| 2:30:00 p. m.  | 117 | 17.58 |

Continuación tabla XVII.

|               |     |       |
|---------------|-----|-------|
| 2:40:00 p. m. | 117 | 17.60 |
| 2:50:00 p. m. | 117 | 17.60 |
| 3:00:00 p. m. | 117 | 17.60 |
| 3:10:00 p. m. | 105 | 15.76 |
| 3:20:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 3:30:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 3:40:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 3:50:00 p. m. | 105 | 15.77 |
| 4:00:00 p. m. | 105 | 15.76 |

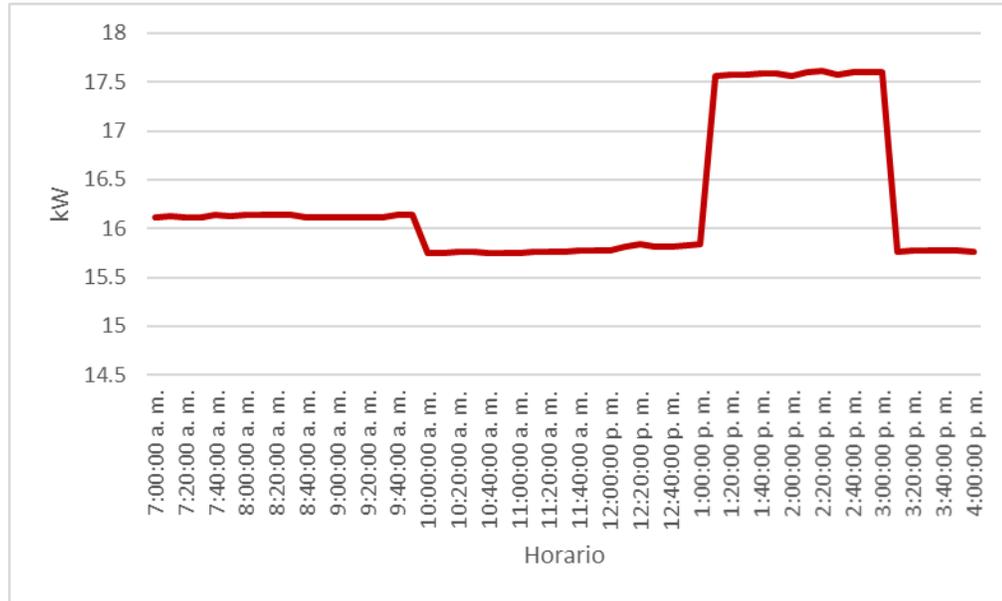
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfica del comportamiento de presiones del compresor 2**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Gráfica del comportamiento de potencias del compresor 2



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1. Análisis energético

Con los resultados de los promedios obtenidos se puede observar gráficamente la presión y el consumo energético de los compresores de aire comprimido. El comportamiento no es el indicado, ya que existen subidas y bajadas de presiones muy prolongadas, y esto provoca un consumo innecesario de energía eléctrica, y que con las medidas correctas se puede reducir.

Tabla XVIII. Conversión de consumo de aire comprimido

| Consumo de aire comprimido de compresores |                        |
|---|------------------------|
| m <sup>3</sup> /hr                        | pies <sup>3</sup> /año |
| 1,410                                     | 436,191,960            |

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Costos anuales} = \text{Precio energía} \times \text{horas anuales} \left[ \frac{\text{hora}}{\text{año}} \right] \times \text{potencia (kW)}$$

Tabla XIX. **Cálculo de costo anual**

|                       |   |                                     |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| Precio kilowatio hora |   | \$0.15                              |
| Horas anuales         |   | 3,500                               |
| Compresores           | Consumo de aire comprimido (pies <sup>3</sup> /año) | Costos anuales de electricidad (\$) |
| 270.8 kW              | 436,191,960   | 284,340.00                          |

Fuente: elaboración propia.

El costo encontrado en los compresores de aire comprimido del área de trituración da un resultado de \$284,340,00. Es un costo elevado para ser una instalación nueva, esto se debe a que en la tubería fueron encontradas fugas de distintos diámetros, acoples mal colocados en las distintas uniones y una mala programación para el trabajo de los compresores.

Es necesario implementar las rutinas de mantenimiento preventivo del sistema de aire comprimido establecidas en el proyecto. Se recomienda una mayor atención e inspecciones a los equipos y sus componentes, para evitar fallos que puedan afectar el funcionamiento de la red de aire comprimido y buscar una programación más adecuada, ya que en la actual existen subidas y bajadas muy prologadas de presiones y esto aumenta el consumo eléctrico. Se deben seguir las recomendaciones siguientes para reducir el consumo eléctrico actual.

## 4.2. Recomendaciones para reducir el costo energético

Existen muchas formas de obtener un ahorro energético en un sistema de aire comprimido. Es importante tomar en cuenta y aplicar las medidas recomendadas y conocer dónde se encuentran los ahorros y gastos de la generación de aire comprimido, ya que un ahorro energético en el sistema garantiza un ahorro en el presupuesto establecido para el departamento de mantenimiento.

Tabla XX. **Ahorros potenciales de energía**

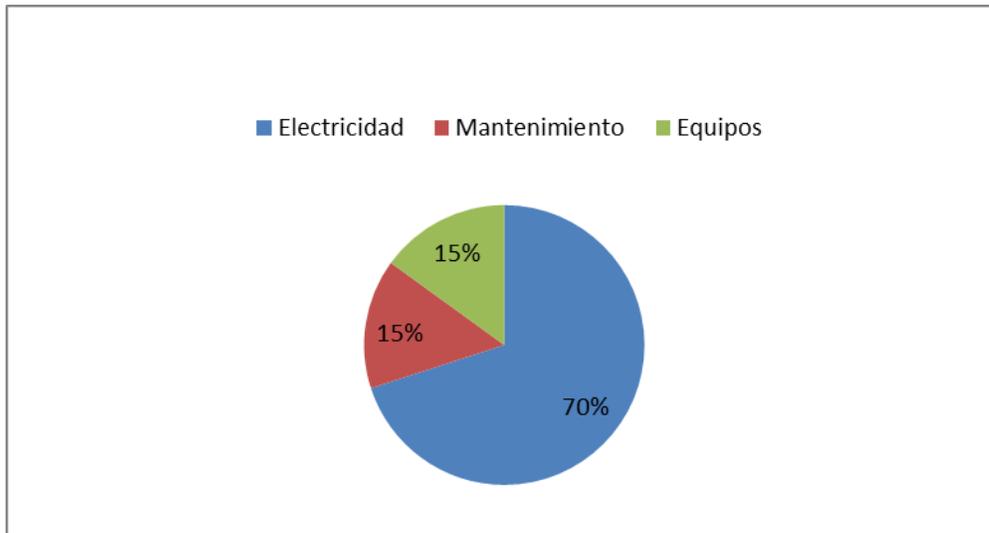
|          |   |
|----------|---|
| 6% - 10% | Reducción de fugas por renovación de la red de aire comprimido y disminución de la presión de trabajo promedio. |
| 10%      | Utilización óptima gracias a sistemas de control modernos usados en compresores y coordinación de la estación.  |
| 10%      | Optimización de los componentes   |
| 2%       | Optimización de sistemas de tratamiento de aire y condensados.  |

Fuente: *Ahorros potenciales de energía.*

[https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia\\_energetica](https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia_energetica)

Consulta: 8 de junio de 2017.

Figura 13. **Costos asociados a la generación de aire comprimido**



Fuente: *Costos asociados a la generación de aire comprimido.*

[https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia\\_energetica](https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia_energetica)

Consulta: 8 de junio de 2017

#### **4.2.1. Apagado de los compresores**

La semana cuenta con 168 horas, la mayoría de sistemas de aire comprimido y los compresores trabajan aproximadamente entre 60 y 100 horas. Dependiendo de la necesidad se recomienda apagar los compresores durante las noches y el fin de semana, ya que esto puede llegar a reducir el consumo de energía en un 20 %.

#### **4.2.2. Arreglo de posibles fugas**

Un estudio realizado por Kaeser Compresores determinó que una fuga de aire de un tamaño de un cuarto de pulgada a una presión de 100 psi puede llegar a costar más de Q. 18 000,00 al año, y la probabilidad de que un sistema de tubería que tiene más de cinco años funcionando presenta fugas es de un 25

% . Es decir que existirá un mayor consumo de energía para generar más presión de aire comprimido, y una fuga de aire en la tubería representa pérdidas de dinero. El 80 % de las fugas no se pueden escuchar.

Tabla XXI. **Costos a diferentes presiones de un orificio de ¼ pulg.**

| <b>Presión psi</b> | <b>Costo anual \$</b> |
|--------------------|-----------------------|
| 60                 | 2,288                 |
| 90                 | 3,289                 |
| 100                | 3,718                 |

(Costos de un año de trabajo, \$ 0.15 kW/h y una potencia de 20 kW)

Fuente: *Costos a diferentes presiones.*

<http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2016/09/26/fugas-en-un-sistema-de-aire-comprimido>. Consulta: 12 de junio de 2017

#### **4.2.3. Prevención de nuevas fugas**

Se debe ser proactivo y estar revisando el sistema de tubería del aire comprimido. Un tubo seco y limpio indica una buena calidad de aire y que no existe corrosión dentro de él. La suciedad interna en la tubería es causada por las partículas que ingresan por medio del compresor, por eso es recomendable que el sistema cuente con su filtro, separador, secador y trampas de condensado. Si existe corrosión en la tubería, la probabilidad de fugas será mayor, por eso es mejor prevenir y evitar pérdidas de dinero.

#### **4.2.4. Reducir la presión, mantener la presión requerida, no más de lo necesario**

La reducción de 2 psi en el sistema reduce el consumo energético en 1 %. Es útil verificar el sistema de presión y evitar subir la presión para compensar

fugas, caídas de presión u obstrucciones en la tubería. Una buena programación del Supervisor Controller puede reducir en gran medida la presión de operación y generar la producción de aire de manera mucho más eficiente y efectiva.

#### **4.2.5. Chequeo de drenajes**

Los drenajes de condensado automático, deben ajustarse periódicamente para asegurar que se abran al momento configurado y su cierre sea total. Se recomienda reemplazar los condensados automáticos por drenajes de pérdidas cero, para que no se tenga un desperdicio de aire comprimido.

#### **4.2.6. Revisión de la infraestructura de la tubería**

El diseño de un sistema de tuberías debe optimizar la transferencia de aire comprimido al flujo y presión deseados hasta el punto de uso. Aumentar el tamaño de la tubería de dos a tres pulgadas puede reducir la caída de presión hasta el 50 %. Acortar las distancias que el aire tiene que recorrer puede reducir aún más las caídas de presión en un 20 y 40 por ciento. Cuanto más fluya el aire a través de la tubería, mayor será la caída de presión. La caída de presión en un tubo aumenta con el cuadrado del aumento del flujo. La tubería de distribución de aire debe ser lo suficientemente grande en diámetro para minimizar la caída de presión.

#### **4.2.7. Cambiar los filtros sistemáticamente, no de vez en cuando**

Es útil inspeccionar y reemplazar los filtros sistemáticamente para asegurar la calidad del aire y las caídas de presión que se pueden prevenir. Se

deben inspeccionar los filtros que no pertenecen al compresor de aire y de la sala de compresores. Estos son importantes para mantener los filtros en buen estado, tanto los de la sala de compresores y como los del mismo compresor.

#### **4.2.8. Recuperar el calor generado por la compresión del aire**

La compresión del aire genera calor, se sabe que el 90 % de este calor se puede reutilizar para su uso en operación. Por ejemplo, se puede utilizar para generar aire caliente. El ahorro realmente puede ser significativo.

#### **4.2.9. Enfatizar el mantenimiento adecuado e ignorar los costos de mantenimiento**

Un compresor funciona mejor y más eficientemente cuando se le aplica de una manera correcta su mantenimiento preventivo. El correcto mantenimiento a un compresor reduce el consumo energético, ayuda a prevenir fallas en el sistema y se evitan paradas en la producción. Se recomienda llevar un mantenimiento adecuado de los equipos del sistema de aire comprimido.

#### **4.2.10. Identificar y eliminar el mal uso del aire comprimido en el sistema de aire**

El uso inapropiado del aire comprimido incluye cualquier aplicación que puede ser más eficiente mediante otro método que no sea aire comprimido. Un ejemplo claro es la presión de aire alta, que es utilizada para enfriamiento o aplicaciones donde una baja presión de aire es requerida.

La generación de aire comprimido es un servicio bastante costoso, el consumo de energía eléctrica es elevado, en comparación al mantenimiento del

mismo y el de los equipos. De ahí nace la necesidad de evitar un desperdicio de la energía eléctrica; entre más se evite el desperdicio eléctrico, menor gasto se generará en el presupuesto asignado a dicho servicio de aire.

## CONCLUSIONES

1. Es necesaria la implementación correcta de un mantenimiento preventivo para el sistema de aire comprimido, para evitar paradas no programadas, problemas técnicos y mecánicos. De esta manera se logra prolongar la vida y tener un buen funcionamiento de los compresores, separadores, secadores, tanques de almacenamiento y tubería.
2. Se debe seguir la guía elaborada y las rutinas establecidas en el manual de mantenimiento preventivo del sistema de aire comprimido, para conocer las condiciones en las cuales los equipos trabajan y el estado en que se encuentran. Una buena implementación y control de las rutinas de mantenimiento aseguran un funcionamiento óptimo, cumpliendo con las necesidades de operación y aumentado la vida útil de los equipos.
3. Es importante contar con personal técnico y operativo capacitado, ya que se debe tener el conocimiento correcto de los equipos al momento de realizar un mantenimiento preventivo y correctivo, conocer su funcionamiento, sus partes y componentes, así como las condiciones de trabajo para poder programarlos de acuerdo a la necesidad que exista en ese momento.
4. Seguir cada una de las normas de seguridad establecidas al momento de realizar un mantenimiento, ya que el riesgo que existe es elevado por las piezas en movimiento, espacios confinados, trabajos en altura, trabajo en caliente y trabajo eléctrico. Es necesario capacitar al personal para asegurar su salud y seguridad ocupacional.



## **RECOMENDACIONES**

### **Gerencia de mantenimiento**

1. Llevar el control actualizado de las actividades que se le realizan a cada uno de los equipos del sistema de aire comprimido.

### **Jefe de mantenimiento**

2. Contar con personal capacitado para realizar las rutinas de los mantenimientos preventivos de los equipos de aire comprimido.
3. Capacitar constantemente al personal técnico y operativo.
4. Cada uno de los técnicos debe contar con su equipo de protección personal, equipo de bloqueo y etiquetado, al momento de realizar las rutinas de mantenimiento.

### **Técnicos operarios**

5. Se deben seguir todos los procedimientos administrativos que exige el departamento de seguridad industrial para poder realizar un mantenimiento preventivo.
6. Al bloquear un equipo, es útil asegurarse que se encuentre desenergizado y etiquetarlo, para que cualquier persona que se acerque al área sepa que se está realizando un mantenimiento.

7. Asegurarse que en el área donde se realiza el mantenimiento se encuentre el botiquín de primeros auxilios.
8. Seguir cada una de las rutinas de mantenimiento preventivo establecidas.
9. Conocer el funcionamiento del equipo y cada uno de sus componentes, al momento de realizar los mantenimientos respectivos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cementos Progreso. *Historia, misión, visión, valores*. [en línea]. <<http://www.cempro.com/index.php/quienes-somos>> [Consulta: 2017].
2. GILVONIO ALEGRÍA, Leonicio Rubén. *El ahorro de energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 2005. 138 p.
3. KASER, *Aire comprimido*. [en línea] <[www.kaeser.com.gt](http://www.kaeser.com.gt)>. [Consulta: 2017].
4. KOHLHAAS, B.; LABAHN, Otto. *Prontuario del cemento*. Barcelona: Reverté, S.A., 1985. 1016p.
5. LUSZCZEWSKI, Antoni. *Redes industriales de tubería. Bombas para agua, ventiladores y compresores*. España: Reverté Ediciones, S.A., 2004. 312p.
6. *Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos*. [en línea] <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/comprimido/comprimido.htm>>. [Consulta: 12 de abril de 2017].



## APÉNDICES

### Apéndice 1. **Protocolo de arranque de los compresores de aire comprimido tipo tornillo**

El procedimiento de arranque es la etapa culminante, se verifica que todo ha sido instalado de acuerdo a las especificaciones de diseño, se busca el correcto funcionamiento de todas y cada una de las partes que integran el proceso y, por último, se arranca el equipo para obtener el resultado deseado con la calidad establecida. El sistema de alimentación de aire incluye:

- Compresor de tornillo rotativo
- Almacenamiento en húmedo
- Secador regenerativo
- Filtros para satisfacer las necesidades del cliente
- Almacenamiento en seco
- Controlador de flujo
- Purgadores
- Separador de aceite lubricante
- *Supervisor controller*

Continuación apéndice 1.

### Sistema de alimentación



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluido llamados compresibles, tales como gases y vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por este, convirtiéndose en energía de flujo y aumentando su presión y energía cinética, impulsándola a fluir.

- Compresor de tornillo:

Es impulsado por un motor (puede ser eléctrico, diesel, neumático, etc.). Utiliza dos tornillos largos para comprimir el aire dentro de una cámara larga. Para evitar el daño de los mismos tornillos, es insertado aceite para mantener todo el sistema lubricado. El aceite es mezclado con el aire en la entrada de la cámara y es transportado al espacio entre

## Continuación apéndice 1.

los dos tornillos rotativos. Al salir de la cámara, el aire y el aceite pasan a través de un largo separador de aceite donde el aire ya pasa listo a través de un pequeño orificio filtrador. El aceite es enfriado y reutilizado mientras que el aire va al tanque de reserva para ser utilizado en su trabajo.

En los rotores de perfil asimétrico el contacto solo se produce en una línea de paso lubricada, de modo que prácticamente no existe desgaste. Con esto no se pierde capacidad ni eficiencia. La lubricación a presión controlada y los depósitos de lubricante para rodamientos aseguran un suministro fiable de fluido a los elementos rotativos.

- Partes importantes

### Separador del aire y lubricante:

- Los elementos del separador reducen el arrastre de lubricante a un máximo de 1 ppm.
- El arrastre reducido disminuye los costos de reposición de lubricante.
- Los elementos plegados reducen la caída de presión para lograr una mayor eficiencia y prolongar la vida útil de los elementos.
- Fáciles de cambiar.

### Filtro de admisión:

- Incluye una conexión de admisión de aire remota.

#### Continuación apéndice 1.

- Mantiene limpio el lubricante y prolonga la vida útil de otros componentes internos.
- Reduce la caída de presión a lo largo de la vida útil, lo que resulta en un ahorro de energía.

#### Mantenimiento mejorado para el enfriador de lubricante por aire:

- Paneles fáciles de desmontar que brindan acceso para limpiar los enfriadores.

#### Motor conectado con la unidad de aire a través de un acoplamiento flexible no lubricado:

- Permite usar motores de armazón NEMA estándar
- Simplifica la instalación y la puesta en marcha

#### Sistema de control de capacidad variable con tecnología de válvulas espiral:

- Disminuye los costos de operación a carga parcial
- Reduce la carga cíclica en el paquete
- Mantiene la presión de la planta constante
- Control sencillo
- Reduce la carga de los rodamientos

#### Unidad de aire del compresor de dos etapas:

- Proporciona más aire

#### Continuación apéndice 1.

- Reduce el consumo de energía
- Prolonga la vida útil de los rodamientos en la unidad compresora

#### Filtro de lubricante de fibra de vidrio:

- El soporte de calidad aeronáutica ofrece una filtración mejor.
- Es hasta un 20 % más eficaz que los elementos convencionales de papel.
- Prolonga la vida útil del compresor.

- Supervisor Controller

- El controlador de microprocesadores compatible con ordenadores muestra ilustraciones sencillas de gráficos de las funciones supervisadas y un teclado fácil de leer.
- Lectura constante de la presión y temperatura.
- Lectura bajo demanda de todas las condiciones de funcionamiento y mantenimiento.
- Supervisa las funciones clave y las paradas de seguridad.
- Reencendido automático después de un corte en el suministro eléctrico.
- Control doble que ofrece una operación automática de arranque/parada.
- Adelanto/retraso y control secuencial con varios compresores.
- Programa de servicio y mantenimiento preventivo.
- Se registran las horas de marcha ("RUN"), de carga ("*loaded*") y de insumos consumibles ("*consumable parts*").
- Historial de fallos con lecturas de los sensores.

Continuación apéndice 1.

- La tecla "*help*" (ayuda) ofrece una guía de resolución de problemas.
  
- Procedimiento de arranque

### Modo de arranque

| Modo de arranque - 0 a 50 psi |  |
|-------------------------------|--|
|                               | Presionar el botón de encendido del compresor.                                     |
|                               | Presión del separador sube de 0 a 50 psi.  |
|                               | Reguladores de presión cerrados  |
|                               | Electroválvula cerrada.  |
|                               | Válvula neumática de admisión sin operar.  |
|                               | Luego de 8 segundos, la electroválvula se abrirá, abriendo la válvula de admisión. |
|                               | El compresor comenzará a funcionar a su capacidad nominal total.                   |
|                               | La presión está aislada de la línea de servicio.                                   |

Fuente: elaboración propia.

### Preparación eléctrica

| Preparación eléctrica |   |
|-----------------------|---|
|                       | Comprobar que el compresor está bien cableado para la tensión de red. |
|                       | Comprobar la tensión en llegada                                       |

Continuación apéndice 1.

|  |   |
|--|---|
|  | Comprobar las características del relé de arranque.                                       |
|  | Comprobar las características de los relés de sobre carga térmica.                        |
|  | Comprobar los collarines calefactores.  |
|  | Comprobar el apriete de todas las conexiones eléctricas.                                  |
|  | Poner en funcionamiento blanco (desconectando los tres cables de alimentación del motor). |
|  | Volver a conectar los tres cables del motor.  |
|  | Hacer funcionar el motor por impulsos para comprobar el sentido de rotación.              |
|  | Verificar todas las direcciones de rotación en los motores auxiliares.                    |

Fuente: elaboración propia.

### Primera puesta en marcha

| <b>Procedimiento para la primera puesta en marcha</b> |  |
|---|--|
|   | Leer detenidamente las secciones anteriores.                                   |
|   | Empujar levemente el motor para verificar la rotación correcta del ventilador. |
|   | Asegurarse que se ha realizado una instalación correcta del compresor          |
|   | Abrir la válvula de aislamiento hacia el círculo de servicio.                  |
|   | Comprobar que no existan fugas en los tubos.                                   |

Continuación apéndice 1.

|                   |   |
|-------------------|---|
|                   | Cerrar lentamente la válvula de aislamiento para asegurarse que el valor nominal de ajuste de descarga de presión es el correcto. |
|                   | El compresor se descargó a presión nominal.   |
|                   | Observar la temperatura de servicio no debe ser mayor a 93°C  |
|                   | Abrir la válvula de aislamiento hacia el circuito de servicio.  |
| Al siguiente día: |   |
|                   | Comprobar temperatura   |
|                   | Comprobar que no existan fugas.   |

Fuente: elaboración propia.

### Arranques posteriores

| <b>Procedimiento para los arranques posteriores</b> |   |
|---|---|
|   | Comprobar el nivel del fluido en el cristal de inspección.      |
|   | Presionar el botón ARRANQUE (START) o modo AUTOMÁTICO.          |
|   | Observar el panel de mandos y los indicadores de mantenimiento. |

Fuente: elaboración propia.

# ANEXOS

## Anexo 1. Pictogramas de seguridad

### Seguridad de ventilador



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

### Superficies calientes



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

Continuación anexo 1.

### Atrapamiento



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

### Riesgo eléctrico



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

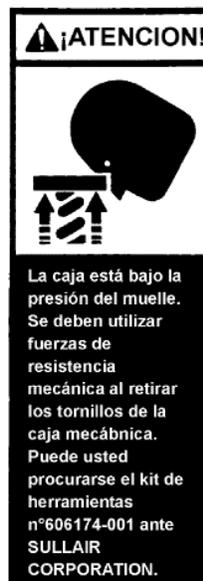
Continuación anexo 1.

### Aire peligroso



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

### Riesgo mecánico



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

Continuación anexo 1.

### Línea de fuego



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.

### Aire tóxico



Fuente: *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 2017.