

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

**REDISEÑO DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA  
GRÁFICA IMPRENTA DON BOSCO C.S.P.**

**AUTOR:**

**EDISON MAURICIO JACHO LOACHAMIN**

**TUTOR:**

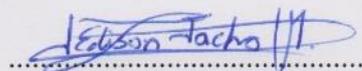
**JOSÉ OLGHER PÉREZ SILVA**

**Quito, mayo del 2016**

### **Cesión de derechos de autor**

Yo Edison Mauricio Jacho Loachamin, con documento de identificación N° 1722552732, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Rediseño de la red de aire comprimido de la nave industrial de la empresa gráfica imprenta Don Bosco C.S.P.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

  
.....

Nombre: Edison Mauricio Jacho Loachamin

Cédula: 1722552732

Fecha: 2016 – 05 – 20

### **Declaratoria de coautoría del docente tutor**

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación REDISEÑO DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA GRÁFICA IMPRENTA DON BOSCO C.S.P. realizado por Edison Mauricio Jacho Loachamin obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, mayo del 2016



José Olger Pérez Silva

CI: 1709822751

### **Dedicatoria**

El presente proyecto se lo dedico a Dios como una forma de alabanza, porque durante todo el proceso de elaboración tuve caídas y sé que en los días más duros la energía que das al mundo en forma de vida y alegrías me ayudo a levantarme. Entiendo que no se logran triunfos sin sacrificios, sin embargo los he sabido superar acompañado de dos seres llenos de tu energía, de los que soy responsable. Por eso dedico también mi esfuerzo a mi esposa y a mi hijo porque no lo hubiera logrado sin su ayuda. Y a todas las personas que creyeron en mí, a mis papás: Elvia y Carlos, porque ustedes me encaminaron a esta meta creyendo que la mejor herencia que nos pueden dejar son los estudios.

### **Agradecimientos**

Agradezco a mi tutor, Ing. Olger Pérez y a José Farinango, jefe del departamento de mantenimiento de la imprenta Don Bosco C.S.P., por la confianza depositada en mí para desenvolverme durante el desarrollo del proyecto. Agradezco a la comunidad salesiana y en especial a la Imprenta Don Bosco C.S.P. por permitirme adquirir la información necesaria para desarrollar el proyecto.

## Índice

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 1: Marco teórico</b> .....  | 3  |
| <b>1.1. La industria gráfica</b> .....  | 3  |
| <b>1.1.1. Pasos para el proceso de impresión</b> .....  | 3  |
| <b>1.2. Neumática</b> .....   | 4  |
| <b>1.2.1. Fundamentos físicos y principios termodinámicos</b> .....   | 5  |
| <b>1.2.2. Caudal volumétrico</b> .....  | 6  |
| <b>1.2.3. Efecto de la altitud en el compresor</b> .....  | 7  |
| <b>1.2.4. Características del aire comprimido</b> .....   | 8  |
| <b>1.2.5. Producción del aire comprimido</b> .....  | 9  |
| <b>1.2.6. Calidad de aire</b> .....   | 11 |
| <b>1.3. Red de distribución de aire comprimido</b> .....  | 18 |
| <b>1.3.1. Depósitos de aire comprimido</b> .....  | 18 |
| <b>1.3.2. Distribución del aire comprimido</b> .....  | 21 |
| <b>1.3.3. Caída de presión en la red de distribución</b> .....  | 25 |
| <b>1.3.4. Dimensionamiento de la tubería del sistema de aire comprimido</b> .....   | 25 |
| <b>1.3.5. Factores importantes a tomar en cuenta en el rediseño</b> .....   | 32 |
| <b>Capítulo 2: Redimensionamiento de la red de aire comprimido de la planta de producción de imprenta Don Bosco</b> ..... | 36 |
| <b>2.1. Recopilación de datos de la actual red de aire comprimido</b> .....   | 36 |
| <b>2.1.1. Presiones de trabajo de la actual red</b> .....   | 36 |
| <b>2.1.2. Consumo eléctrico del compresor</b> .....   | 37 |
| <b>2.1.3. Consumo de aire comprimido actual de la nave industrial</b> .....   | 47 |
| <b>2.1.4. Calidad de aire actual</b> .....  | 50 |
| <b>2.1.5. Análisis de la configuración actual de la red de aire comprimido</b> .....                                      | 52 |
| <b>2.1.6. Identificación de defectos de diseño en la red actual de aire comprimido</b> .....                              | 57 |
| <b>2.2. Desarrollo de cálculos para el rediseño</b> .....   | 57 |
| <b>2.2.1 Determinación de los parámetros requeridos para el desarrollo de los cálculos</b> .....                          | 58 |
| <b>2.2.2. Presión de trabajo</b> .....  | 58 |
| <b>2.2.3. Cálculo del consumo total de aire presurizado de la nave industrial</b> .....                                   | 61 |
| <b>2.2.4. Cálculo de las características del nuevo compresor</b> .....  | 62 |
| <b>2.2.5. Selección de la calidad del aire para el sistema de distribución</b> .....                                      | 63 |
| <b>2.2.6. Dimensionamiento del tanque principal</b> .....   | 65 |
| <b>2.2.7. Diagrama P&amp;ID del rediseño</b> .....  | 67 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.2.8. Dimensionamiento de las tuberías .....                                | 68         |
| <b>Capítulo 3: Análisis de resultados y cálculo de costos .....</b>          | <b>91</b>  |
| 3.1. Análisis de resultados .....  | 91         |
| 3.1.1. Consumo de aire comprimido actual y proyección para el rediseño<br>91 |            |
| 3.1.2. Elección del compresor .....  | 92         |
| 3.1.3. Calidad del aire .....  | 94         |
| 3.1.4. Elección de la tubería para la red de distribución .....              | 94         |
| 3.2. Cálculo de costos.....  | 96         |
| 3.2.1. Cálculo de costos indirectos.....                                     | 96         |
| 3.2.2. Cálculo de costos directos.....                                       | 97         |
| <b>Conclusiones .....</b>  | <b>101</b> |
| <b>Recomendaciones .....</b>   | <b>103</b> |
| <b>Referencias .....</b>   | <b>104</b> |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Saturación del aire por agua (Punto de condensación) .....  | 15 |
| Tabla 2. Clases de calidad del aire comprimido según la norma ISO 8573-1 (2010) .....  | 17 |
| Tabla 3. Factor de simultaneidad mediante una tabla .....  | 27 |
| Tabla 4. Longitud equivalente de la tubería .....  | 30 |
| Tabla 5. Presión y caudal que entrega el compresor actual .....  | 36 |
| Tabla 6. Picos de consumo de la potencia aparente media de los días estudiados .....   | 42 |
| Tabla 7. Tarifa del costo del kilovatio-hora dependiendo del horario en que se consume la energía .....                      | 44 |
| Tabla 8. Consumo de energía y costo por día durante 7 días y 12 horas .....  | 44 |
| Tabla 9. Desglose del consumo energético de un día de trabajo del compresor .....  | 45 |
| Tabla 10. Lista de máquinas que necesitan aire comprimido .....  | 48 |
| Tabla 11. Lista de máquinas que están conectadas al anillo actual de aire comprimido, su factor de uso y simultaneidad ..... | 49 |
| Tabla 12. Resultados del caudal corregido en diferentes unidades de flujo volumétrico .....                                  | 50 |
| Tabla 13. Datos para el cálculo del tanque .....   | 55 |
| Tabla 14. Lista de máquinas que necesitan aire comprimido .....  | 59 |
| Tabla 15. Lista de máquinas, su factor de uso y simultaneidad .....  | 60 |
| Tabla 16. Resultados del caudal corregido en diferentes unidades .....   | 61 |
| Tabla 17. Datos para el cálculo del tanque .....   | 65 |
| Tabla 18. Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de la red principal .....                                       | 72 |
| Tabla 19. Accesorios y longitud equivalente de línea principal .....   | 73 |
| Tabla 20. Caudales de los tres anillos de distribución .....   | 75 |
| Tabla 21. Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de los tres anillos .....                                       | 75 |
| Tabla 22. Resultados de diámetros calculados .....   | 76 |
| Tabla 23. Accesorios y longitud equivalente de líneas de distribución .....  | 77 |
| Tabla 24. Resultados de diámetros calculados y recalculados del proceso iterativo .....                                      | 77 |
| Tabla 25. Resultados de las caídas de presión calculadas .....   | 81 |
| Tabla 26. Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de las líneas de servicio .....                                 | 82 |
| Tabla 27. Cálculo del diámetro de las líneas de servicio .....   | 83 |
| Tabla 28. Accesorios y longitud equivalente de las líneas de servicio .....  | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 29. Longitudes totales de las líneas de servicio .....                                  | 86  |
| Tabla 30. Resultados de diámetros calculados y recalculados del proceso iterativo .           | 87  |
| Tabla 31. Caída de presión en las líneas de servicio .....                                    | 88  |
| Tabla 32. Resumen de resultados .....   | 90  |
| Tabla 33. Gasto inicial y plan de mantenimiento preventivo del compresor Kaeser .             | 92  |
| Tabla 34. Gasto inicial y plan de mantenimiento preventivo del compresor Atlas<br>Copco ..... | 92  |
| Tabla 35. Comparación de costos entre compresores .....                                       | 93  |
| Tabla 36. Tabla de costos indirectos .....  | 97  |
| Tabla 37. Elementos a ser cotizados .....   | 97  |
| Tabla 38. Costo de elementos a ser cotizados .....  | 98  |
| Tabla 39. Longitud de tubería y accesorios.....   | 98  |
| Tabla 40. Detalle del precio de la tubería.....   | 99  |
| Tabla 41. Precios de los accesorios clasificados por su medida .....                          | 99  |
| Tabla 42. Resumen de valores.....   | 100 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Generación y preparación del aire .....  | 9  |
| Figura 2. Clasificación de los compresores de acuerdo a su principio de funcionamiento .....   | 10 |
| Figura 3. Purificación del aire .....  | 12 |
| Figura 4. Clasificación de las partículas sólidas en la atmósfera según su tamaño ...  | 13 |
| Figura 5. Calidad del aire para diferentes aplicaciones neumáticas .....   | 16 |
| Figura 6. Depósito, acumuladores intermedios y colectores .....  | 19 |
| Figura 7. Tanque para el aire comprimido .....   | 20 |
| Figura 8. Partes principales de un sistema de distribución de aire comprimido .....  | 22 |
| Figura 9. Red de distribución de aire a presión.....   | 23 |
| Figura 10. Salidas de aire (a) y agua (b) de línea principal.....  | 23 |
| Figura 11. Configuración de línea principal con final en línea muerta .....  | 24 |
| Figura 12. Configuración de línea principal en anillo .....  | 24 |
| Figura 13. Factor de simultaneidad mediante una curva .....  | 26 |
| Figura 14. Nomograma .....   | 31 |
| Figura 15. Costo del ciclo de vida de un compresor .....   | 32 |
| Figura 16. Balance energético de un compresor .....  | 33 |
| Figura 17. Filtro regulador con manómetro y lubricador.....  | 35 |
| Figura 18. Ahorro económico con un consumo eficiente de energía eléctrica .....  | 46 |
| Figura 19. Identificación de la calidad del aire de la red actual mediante el esquema de tratamiento de aire con secador refrigerativo ..... | 51 |
| Figura 20. Compresor actual .....  | 52 |
| Figura 21. Secador actual .....  | 53 |
| Figura 22. Tanque actual.....  | 54 |
| Figura 23. Diagrama P&ID de la configuración actual.....   | 56 |
| Figura 24. Tubería legris transair .....   | 62 |
| Figura 25. Selección de la calidad de aire para el rediseño de la red de aire comprimido .....   | 63 |
| Figura 26. Diagrama P&ID del sistema de generación de aire comprimido del rediseño .....   | 67 |
| Figura 27. Detalle del colector .....  | 68 |
| Figura 28. Bosquejo del rediseño de la red de aire comprimido .....  | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29. Línea principal .....   | 70 |
| Figura 30. Líneas de distribución .....  | 70 |
| Figura 31. Líneas de servicio .....  | 71 |
| Figura 32. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea principal mediante nomograma .....                             | 74 |
| Figura 33. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área encuadernación) mediante nomograma ..... | 78 |
| Figura 34. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área digital) mediante nomograma .....        | 79 |
| Figura 35. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área prensas) mediante nomograma .....        | 80 |
| Figura 36. Producción actual de aire comprimido vs. Rediseño .....   | 91 |
| Figura 37. Comparación de calidades de aire .....  | 94 |
| Figura 38. Aumento del porcentaje (%) de fugas en el transcurso del tiempo .....   | 95 |
| Figura 39. Defectos de la tubería actual .....   | 96 |

## Índice de ecuaciones

|                  |    |
|------------------|----|
| Ecuación 1.....  | 5  |
| Ecuación 2.....  | 6  |
| Ecuación 3.....  | 8  |
| Ecuación 4.....  | 14 |
| Ecuación 5.....  | 21 |
| Ecuación 6.....  | 27 |
| Ecuación 7.....  | 27 |
| Ecuación 8.....  | 28 |
| Ecuación 9.....  | 28 |
| Ecuación 10..... | 29 |

## **Resumen**

El presente proyecto tiene el objetivo de rediseñar la red de aire comprimido de la nave industrial de la Imprenta Don Bosco – Quito, mediante la elección correcta de los parámetros que requiere el sistema y ejecución adecuada de los cálculos.

En el capítulo I se adquieren los conocimientos científicos y experimentales para el desarrollo del proyecto: las características, el método de cálculo y los parámetros técnicos que rigen el diseño del mismo (en este caso, el rediseño).

En el capítulo II se realiza el levantamiento del plano de planta de la nave industrial en 3D, en el cual incluye la reubicación de las máquinas y las que llegarías meses después. Un total de 25 puntos de abastecimientos: 15 para máquinas y 10 para actividades de mantenimiento. También de las máquinas que utilizan aire comprimido para su funcionamiento se adquirió y documentó información con la cual se determinaron: la presión de trabajo general, la calidad de aire y consumo volumétrico total que requiere la red para su rediseño. Además el material seleccionado para la red de distribución es la tubería legris transair (de aluminio). Y para la configuración de la misma se toma en cuenta la sectorización por áreas de trabajo.

En el capítulo III se detallan los equipos y el material que se necesita, con esto se solicita la cotización de los mismos con la finalidad de determinar la cantidad de inversión que se requiere para la realización del proyecto.

### **Palabras clave**

Aire comprimido, presión de trabajo, consumo volumétrico de aire comprimido, calidad de aire, sistema de distribución de aire comprimido.

## **Abstract**

This project aims to redesign the compressed air system of Imprenta Don Bosco C.S.P. – Quito's industrial plant, by means of appropriate choices of the parameters required by the system and proper execution of calculations.

In Chapter I, we lay out the scientific and experimental knowledge for the development of the project: the characteristics, the calculation method, and the technical parameters that govern the design – or, in this case, the redesign.

Chapter II contains the 3D drawing of the floor plan of the industrial plant, which includes relocation of the machines and space for those which will arrive months later; a total of 25 points of supply: 15 for machines and 10 for maintenance activities. We also acquired and documented information about machines that function using compressed air, with which we determined general working pressure, air quality, and the total volumetric consumption which the system requires for its redesign. Additionally, the selected material for the distribution system is aluminum piping from Legris Transair. For the configuration of the system, workspace divisions are also taken into account.

In Chapter III, we detail the necessary equipment and material, with which information we request an estimate, in order to determine the investment required to realize the project.

### **Keywords**

Compressed air, working pressure, compressed air consumption volumen, air quality, distribution system of compressed air.

## **Introducción**

Imprenta Don Bosco es una empresa gráfica que se dedica a la impresión de libros, trípticos y todo lo referente a difundir la obra salesiana y la religión Católica, sin fines de lucro. Su crecimiento y evolución constante ha generado que se den movimientos internos de los procesos de producción de las áreas de Pre-prensa, Prensa, Encuadernación e impresión Digital; reubicando máquinas y realizando instalaciones de aire comprimido temporales, sin embargo este crecimiento debe ir de la mano con el crecimiento estructural y con el crecimiento de las redes de abastecimiento: eléctrico, agua y en este caso con el crecimiento de la red de la red de aire comprimido.

Actualmente se está acondicionando el nuevo espacio físico para el Área Digital, por la futura llegada de nuevas máquinas para este tipo de impresión. Por eso la actual reestructuración del espacio físico y la llegada de nuevas máquinas hacen necesarios que se estudie la actual red de aire comprimido.

La actual reestructuración del espacio físico y la llegada de nuevas máquinas hacen necesario que se estudie la red de aire comprimido, pues el diseño inicial de este sistema no contempla el constante crecimiento de la empresa, se requiere de una mejor distribución, reducción de fugas, abastecimiento a todos los procesos de trabajo y que se prevea la futura expansión de Imprenta Don Bosco.

## **Objetivos**

### Objetivo general

Rediseñar la red de aire comprimido de la nave industrial de la empresa gráfica Imprenta Don Bosco.

### Objetivos específicos

1. Adquirir información sobre las normas nacionales e internacionales que rigen el diseño e implementación de redes de distribución de aire comprimido.
2. Adquirir documentación actualizada y real de la actual red de aire comprimido.
3. Establecer los requerimientos técnicos de la red de distribución de aire comprimido en función de la infraestructura y procesos de la planta de producción de Imprenta Don Bosco.
4. Analizar y seleccionar la alternativa más idónea en base a un estudio técnico y económico.

## **Capítulo 1:**

### **Marco teórico**

Para el desarrollo del presente capítulo ha sido necesario tomar en consideración la información más relevante y homóloga, encontrada en los artículos, libros y publicaciones sobre aire comprimido, de los autores corporativos: Kaeser, Atlas Copco, SMC corporation, Festo, empresas dedicadas al diseño y fabricación de compresores y a la automatización industrial a nivel mundial. De igual manera se incluyó la información de autores independientes.

#### **1.1. La industria gráfica**

La industria gráfica debe su nombre a su método de producción empleado, que se basa en las artes gráficas. Este término (artes gráficas) aparece tras la invención de la imprenta por Gutenberg, en el siglo XV que desde ese entonces incluía técnicas relacionadas con la producción de libros, la impresión, encuadernación, acabado, etc. Sin embargo a pesar que el concepto de las mismas no ha variado desde esa época, los avances tecnológicos han dado pie a una evolución muy importante de este proceso, anteriormente con la impresión offset (impresión indirecta) y ahora uno de cuyos últimos exponentes es la impresión digital. (Oteyza, 2012)

##### **1.1.1. Pasos para el proceso de impresión**

En una publicación electrónica Surtigraf (2012) se detallan las tres etapas en las que se divide el proceso de impresión:

###### **A. Pre-Prensa:**

Correspondiente a la etapa previa al proceso de impresión del producto, pues antes de mandar a imprimir, el diseño tiene que pasar por un proceso de verificación de formato, orden y color, se lo prepara y transfiere a las placas de impresión, que puede ser de modo tradicional o digital. Hoy en día en las imprentas, la pre-prensa o CTP (computer to plate) es un proceso digital.

## B. Proceso de impresión o prensa:

Empieza con la identificación del papel a ser usado, en ocasiones se necesita cortar esta materia prima para obtener el formato requerido. Para ello se utiliza una máquina (guillotina), que tiene la función de cortar pliegos a escuadra.

Ya en el proceso, se emplean las máquinas de impresión (comúnmente conocidas como prensas porque su principio de funcionamiento para la transferencia indirecta de tinta es la fuerza que se ejerce entre las superficies de los cilindros), las mismas que varían en tamaño dependiendo de sus cuerpos impresores y que definen su capacidad de impresión. Volviéndolos capaces de imprimir miles de pliegos por hora.

## C. Proceso de acabado o encuadernación:

Ésta es la última etapa por la que pasa el arte gráfico, el cual incluye algunos procesos como: corte, por medio de la guillotina, hasta la sección de acabado que necesite el arte, como estampado, realizado o troquelado. El área de acabado se refiere al encolado, anillado, cosido o grapado del material impreso, la inclusión de encartes, el retractilado y todas las actividades necesarias para dar al producto su carácter terminado.

Es preciso mencionar que en las tres etapas para realizar una publicación, (libro, folleto, revista, etc.) se requiere de máquinas automatizadas que mejoren los tiempos de fabricación generando más producto en menor tiempo. Para ellos, estas máquinas, en su mayoría requieren de aire comprimido para su funcionamiento ya que la neumática es parte importante de la ciencia que las constituye.

### **1.2. Neumática**

La neumática trata sobre el estudio del comportamiento y aplicaciones del aire comprimido al ser utilizado como medio para transmitir energía en sistemas de potencia fluida. Proviene del vocablo griego PNEUMA, que significa alma (SMC Internacional Training, 2002).

Actualmente, la técnica neumática constituye el complemento ideal de la ingeniería mecánica. Ayudando a mejorar procesos y tiempos de producción en la industrial; simplificando desplazamientos en mecanismo por su fácil conversión, al

movimiento lineal como al giratorio. Y conjuntamente con los sistemas eléctricos y electrónicos permite tener un alto grado de sofisticación, flexibilidad y control, lo que hoy en día se considera como automatización, Serrano (2011).

De acuerdo con Antonio Creus (2007): las ventajas que presenta el uso de la neumática son el bajo coste de sus componentes, su facilidad de diseño e implementación y el bajo par o la fuerza escasa que puede desarrollar a las bajas presiones con que trabaja (típico 6 bar) lo que constituye un factor de seguridad. Otras características favorables son el riesgo nulo de explosión, su conversión fácil al movimiento giratorio así como al lineal, la posibilidad de transmitir energía a grandes distancias, una construcción y mantenimiento fáciles y la economía en las aplicaciones, (pág. 9).

Sin embargo cabe recalcar que el correcto uso y aprovechamiento de la energía neumática requiere de condiciones adecuadas y características establecidas del fluido, que en la campo de la industria, depende de los requerimientos de cada equipos neumáticos para su buen funcionamiento. Ya que si bien es cierto, el aire es gratis, no es nada barato producir aire comprimido.

### **1.2.1. Fundamentos físicos y principios termodinámicos**

El fluido para la generación de energía neumática es el aire. En el libro Sistemas neumáticos (1998), Majumdar explica que este fluido está compuesto de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y un 1% entre dióxido de carbono y vapor de agua. La tierra está rodeada por la capa gaseosa de dicha sustancia, a la que se la llama atmósfera y que es invisible, incoloro, inodoro y sin sabor, alcanzando una altura total, desde el nivel del mar, hasta 1600 km.

El aire es considerado un gas ideal, aun cuando es una mezcla de gases. Por tal motivo al ser sometido a variaciones de presión, temperatura o de su volumen, se comportará como un gas ideal cumpliendo con las leyes de Boyle, la ley de Charles y Gay-Lussac; y la ley de Amonton o segunda ley de Charles. A partir de éstas, en el libro: Aire comprimido y sus aplicaciones en la industria, Atlas Copco Venezuela, S.A. se obtiene y describe la ecuación general de los gases, en el cual se relaciona el volumen del gas con la masa del mismo:

$$P V = m R T \quad \text{[Ecuación 1]}$$

$$R, \text{ es la constante del determinado gas} = 0,287 \left[ \frac{KJ}{kg. ^\circ K} \right]$$

V, es el volumen que ocupa el determinado gas. [m<sup>3</sup>]

m, es la cantidad másica del gas [kg.]

T, temperatura a la que se encuentra el gas. [°K]

P, presión a la que se encuentra sometido el gas. [kPa]

### 1.2.2. Caudal volumétrico

En el documento, Manual del aire comprimido (2010), obra de gran aporte para el desarrollo del proyecto, Atlas Copco Airpower NV menciona que el caudal volumétrico de un sistema es la magnitud del volumen del fluido que circula por unidad de tiempo y que su unidad en el sistema internacional SI, es el metros cúbicos sobre segundo [m<sup>3</sup>/s].

Explica también que tanto para los compresores como para los equipos neumáticos (máquinas que funcionan con aire comprimido), ya sea para referirse a su capacidad (caudal volumétrico) o su consume de aire a presión, respectivamente, se lo puede espresar de dos forma:

- a. Como caudal bajo “condiciones Standard” o “estado Normal”

El caudal volumétrico es tomado en condiciones de Presión = 1,013 [bar(a)] y Temperatura = 0°C o 273°K, establecidos.

- b. Como volumen de aire libre suministrado (F.A.D. = Free Air Delivery)

Para el aire libre suministrado, el caudal de salida del compresor se recalcula como caudal volumétrico de aire libre a las condiciones reales de presión de entrada y temperatura de entrada al compresor (en la succión).

Y que la relación entre los dos caudales volumétricos se expresa en la siguiente fórmula:

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{T_{FAD}}{T_N} \times \frac{P_N}{P_{FAD}} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:  $q_{FAD}$  : Aire libre suministrado

$q_N$  : Caudal volumétrico normal

$T_{FAD}$  : Temperatura de entrada [°K]

$T_N$  : Temperatura de referencia normal; 273 [°K]

$P_N$  : Presión de referencia normal; 1,013 [bar (a)]

$P_{FAD}$  : Presión de entrada [bar (a)]

### 1.2.3. Efecto de la altitud en el compresor

Tanto la presión como la temperatura ambiente disminuyen, mientras aumenta la altura en relación al nivel del mar. Cuando se comprime el aire en altura, el volumen que absorbe el compresor estará compuesto por una cantidad de masa de aire menor que en condiciones sobre el nivel del mar por tal motivo, para producir el mismo efecto (llegar a la presión establecida) se requerirá un mayor volumen de aire (Atlas Copco Airpower NV, 2010).

Es decir, si se considera a un Compresor X que trabaja sobre el nivel del mar y se quiere conocer cuál será el volumen de aire presurizado que entrega el equipo. Partiendo de la ley de Boyle: “A temperatura constante, el producto de la presión por el volumen del gas es constante”

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Donde:  $P_1$  = Presión atmosférica sobre el nivel del mar

$P_2$  = Presión del aire comprimido

$V_1$  = volumen del aire a presión atmosférica sobre el nivel del mar

$V_2$  = volumen del aire presurizado

Se podrá calcular la cantidad de volumen presurizada mediante la siguiente fórmula:

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} \quad \text{Ec. 1}$$

Ahora si se requiere calcular cual será el volumen presurizado entregado por el mismo compresor, pero trabajando sobre una altitud mayor a la anterior:

$$P_A V_A = P_B V_B$$

Donde:  $P_A$  = Presión atmosférica a una altitud mayor

$P_B$  = Presión del aire comprimido

$V_A$  = volumen del aire a presión atmosférica a una altitud mayor

$V_B$  = volumen del aire presurizado

Se podrá calcular cual es la cantidad de volumen presurizada que se obtendrá:

$$V_B = \frac{P_A V_A}{P_B} \quad \text{Ec. 2}$$

De las ecuaciones 1 y 2, si se considera que:  $V_1 = V_A$  y que  $P_2 = P_B$ , entonces:

$$V_B = \frac{P_A}{P_1} \times V_2$$

Lo que significa que en altura el compresor disminuirá la cantidad de volumen de aire comprimido entregado. Y si se considera este resultado en función del tiempo, es evidente que el caudal volumétrico del compresor también disminuirá proporcionalmente a la altura en que esté trabajando, respecto al nivel del mar.

Para el cálculo real del caudal volumétrico de un compresor que trabaje en Quito se deberá emplear la siguiente fórmula:

$$Q_R = 0,717 \times Q_N \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:  $Q_R = \text{Caudal volumétrico del compresor trabajando en Quito}$

$Q_N = \text{Caudal volumétrico del compresor bajo condiciones normales}$

#### 1.2.4. Características del aire comprimido

Serrano (2011) explica que el aire puede ser sometido a presiones de hasta 12 bares y ser almacenado en depósitos para evitar el continuo funcionamiento de los compresores, alargando así la vida útil de los mismos.

Explica también que el aire se caracteriza por:

- ❖ La fluidez, no ofrece mayor resistencia al desplazamiento.
- ❖ Compresibilidad, permite que una determinada cantidad de este gas, reduzca su volumen.
- ❖ La elasticidad, al comprimir el gas en un recinto hermético, permite que se genere una determinada presión, de la misma magnitud en todas sus superficies en contacto.

Otras características son:

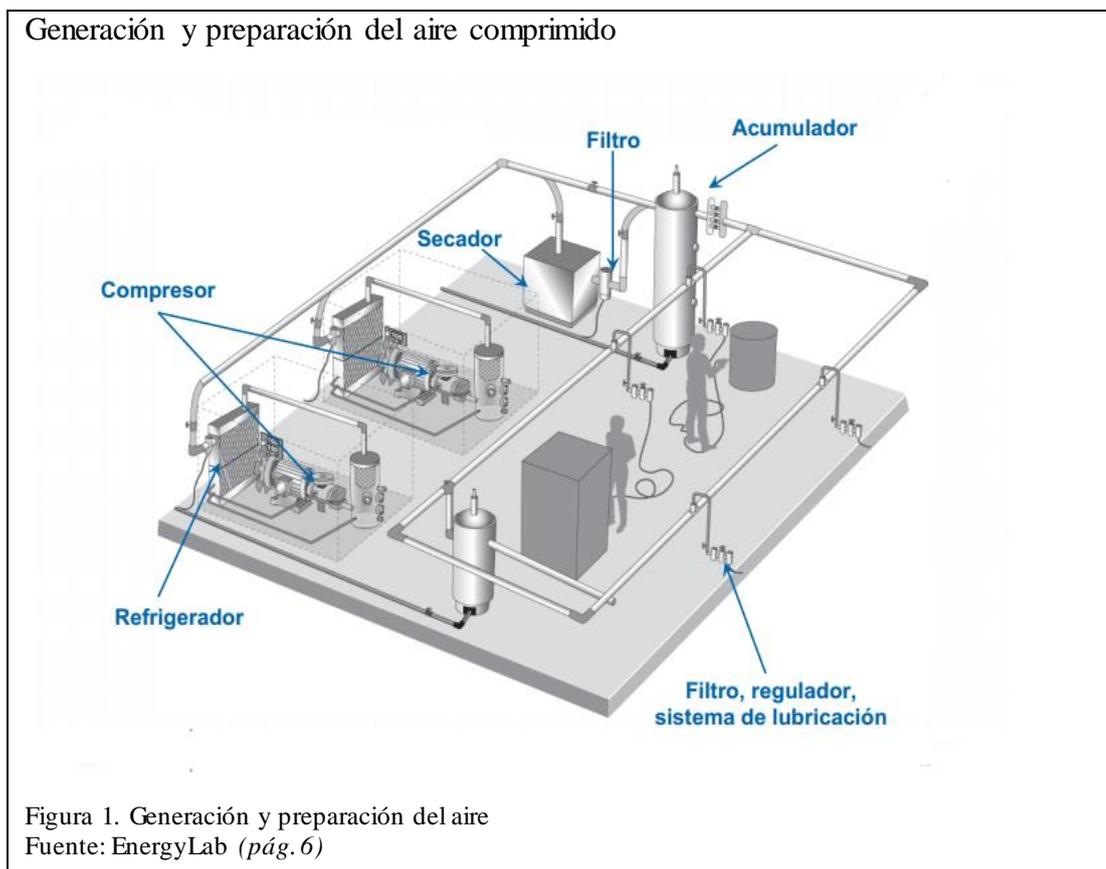
- ❖ Almacenamiento, se pueden almacenar grandes cantidades del gas presurizado, en depósitos diseñados para tales fines.
- ❖ Elección del movimiento, se puede generar movimiento lineal o giratorio dependiendo de la necesidad, mediante los actuadores correspondientes.
- ❖ Economía, la instalación, el costo de los componentes y el mantenimiento requieren de una inversión modesta.

- ❖ Seguridad, el sistema no está afectado por sobrecarga, los actuadores no generan calor y es anti-de flagrante, pues no presenta peligro de incendio en áreas de riesgo elevado. (SMC Internacional Training, 2002)

### 1.2.5. Producción del aire comprimido

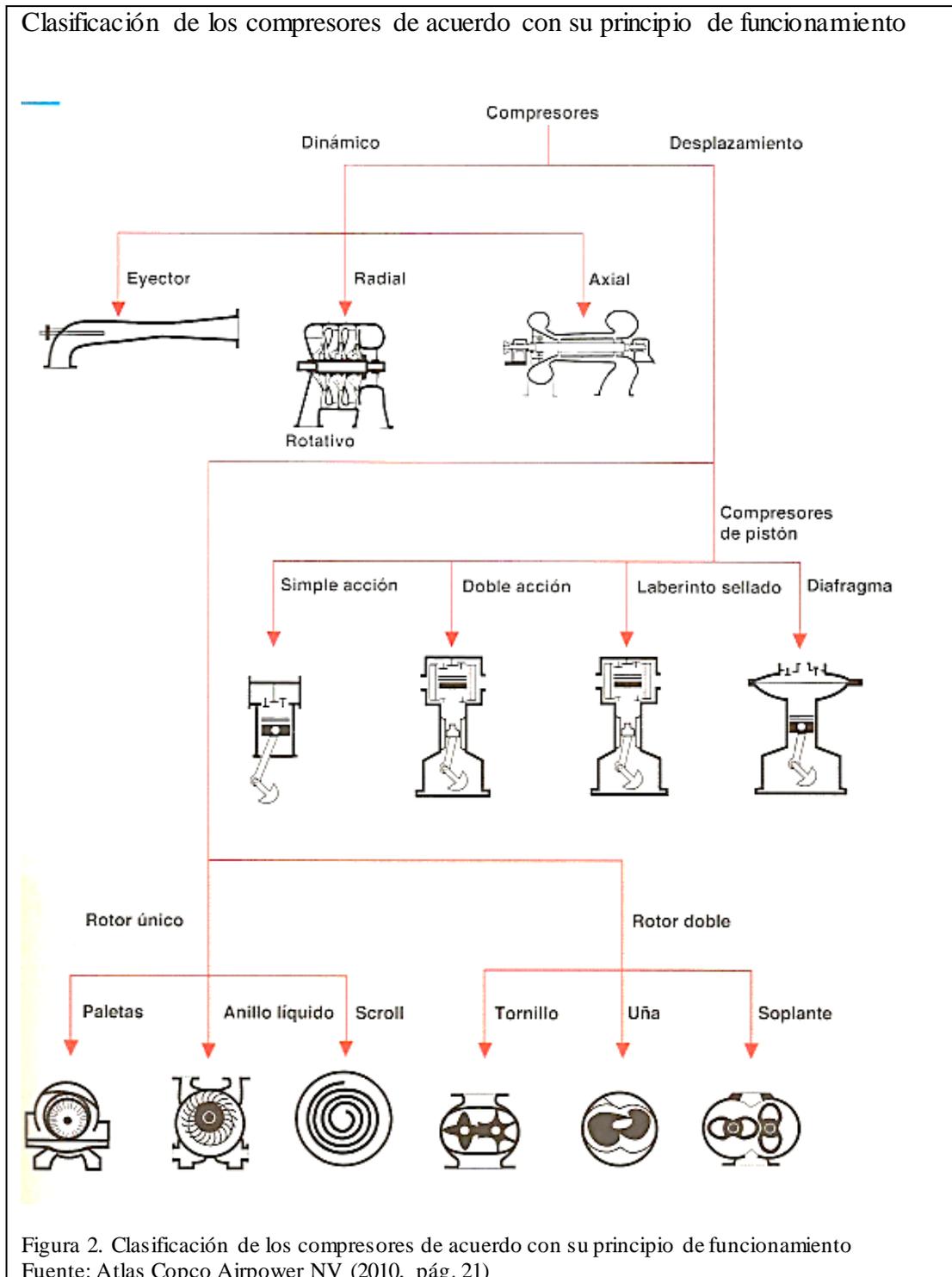
Es necesario hacer énfasis en lo que menciona Antonio Creus, (2007): La neumática precisa de una estación de generación y preparación del aire comprimido formada por un compresor de aire, un depósito, un sistema de preparación del aire (filtro, lubricador y regulador de presión), una red de tuberías para llegar al utilizador y un conjunto de preparación del aire para cada dispositivo neumático individual. (pág. 10)

A continuación se presenta en la figura 1, un esquema sobre la generación y preparación del aire comprimido, en el cual se identifican los elementos antes mencionados.



De acuerdo con Antonio Serrano (2011) : el compresor es el componente principal para la producción de aire comprimido, que se encarga de absorber esta mezcla atmosférica del entorno y elevar la presión del mismo, para después alimentar el depósito y la red general.

A continuación en la figura 2, se presenta la clasificación de los compresores más utilizados en la industria:



En un proyecto realizado por la Unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) y el Instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), se redacta lo siguiente:

Los sistemas industriales de compresión de aire (compresores) generan importantes cantidades de calor, el que puede ser parcialmente recuperado para propósitos útiles. Más del 80% del consumo de potencia del compresor se convierte en calor, la mayor parte del cual se puede recuperar para producir agua o aire caliente. (UPME, Colciencias, pág. 5)

#### ***1.2.5.1. Cuarto de compresores***

Por lo general los compresores se han instalado en pequeñas edificaciones fuera de la nave industrial, pero cercanas a la red instalada. Razones como el ruido que generan, un espacio más limpio que el presentado en el interior de la planta y una mejor refrigeración de los equipos dan pie a que el cuarto de compresores sea una necesidad.

Sin embargo el aire después de pasar por el equipo, no es utilizable para los fines requeridos, pues contiene impurezas en suspensión (tema que se tratará más adelante), a temperatura elevada consecuencia del mismo proceso. Por eso se deben incluir componentes auxiliares que ayuden a que el aire cumpla los parámetros de calidad para el uso adecuado en los diferentes actuadores. (Serrano, 2011)

#### **1.2.6. Calidad de aire**

La purificación del aire comprimido es un factor importante a controlar para obtener un sistema eficiente. El cual se cumple al eliminar las tres sustancias que se encuentran suspendidas en el aire:

- Partículas sólidas
- Aceite
- Humedad de aire

El proceso de purificación se lo puede dividir en tres fases: la eliminación de las partículas suspendidas y aceite (filtración), enfriamiento y liberación de condensado (el secado) y la preparación fina del aire. (Creus, 2007)

De acuerdo con Serrano (2011), el proceso correcto de purificación del aire comprimido es el siguiente:

El aire atmosférico es aspirado a través de un filtro, el cual retiene las impurezas del ambiente; después pasa por el compresor, luego se debe separar el aceite residual del aire mediante los denominados separadores, y restituirlo al circuito de lubricación.

Como siguiente etapa el aire es llevado por un radiador donde, por medio de aire o por intercambiadores de calor, es enfriado, produciéndose un proceso termodinámico, provocando que el vapor de agua contenido en el aire se condense y con ayuda de un decantador de humedad la mayor cantidad de agua se separe, sin embargo no toda. Y para ayudar a desalojar el agua restante se deben colocar llaves de purgas en: el depósito principal y los acumuladores intermedios, y en determinados puntos de la red de aire comprimido.

En la figura 3 se muestra el esquema del proceso de purificación del fluido, descrito en el párrafo anterior.

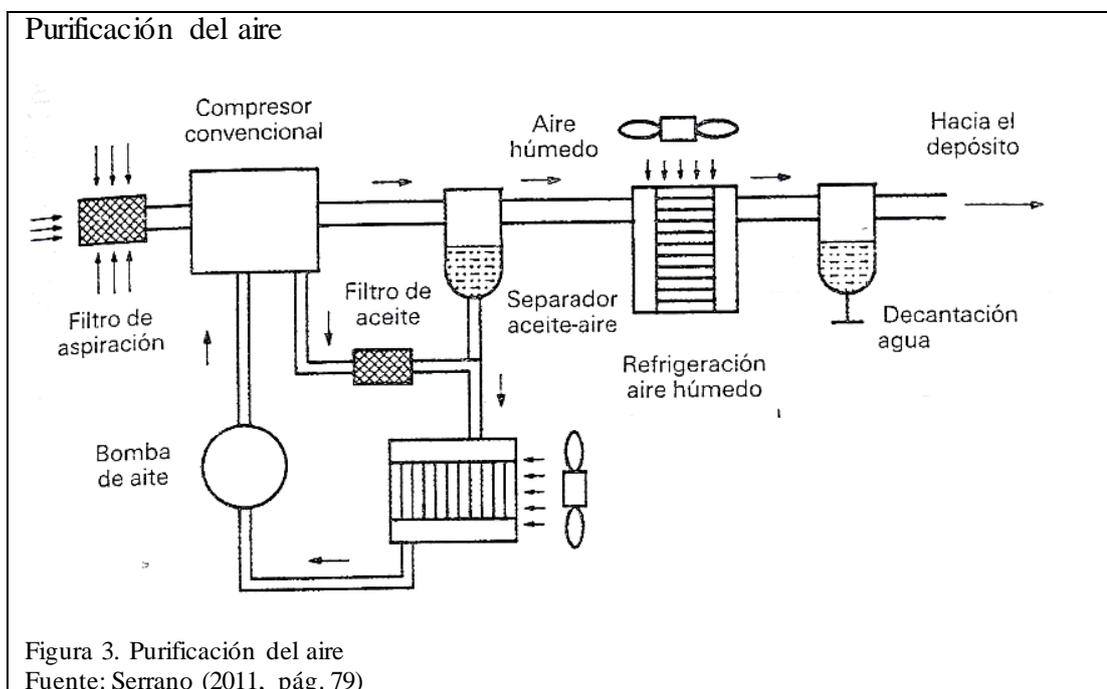


Figura 3. Purificación del aire  
Fuente: Serrano (2011, pág. 79)

Creus (2007), menciona que el aire posterior a su compresión tendrá en suspensión todas las impurezas que muy comúnmente hay en el ambiente, como: polvo, hollín, suciedad, hidrocarburos, gérmenes y vapor de agua, además se incluirán las partículas que vienen del propio compresor, como: abrasión por desgaste y aceites; también los residuos de la red de tuberías, tales como: óxidos y sustancias hermetizantes que se pueden producir durante el montaje de las tuberías y accesorios.

Estas impurezas originan averías y pueden provocar la inutilidad de elementos neumáticos, por tal motivo desde el proceso de producción del aire comprimido hasta el enchufe rápido para una determinada máquina es importante eliminarlas al máximo.

Por tal motivo la combinación adecuada y el orden de filtros, tanques y secadores aseguraran una eliminación eficiente de humedad, aceite y partículas sólidas. Los filtros y secadores están disponibles en varios tamaños y deben seleccionarse con base en el flujo de aire. Tener en cuenta que la capacidad indicada del equipo de tratamiento de aire está basada en condiciones específicas constantes y pueden variar con temperatura ambiente, presión y humedad relativa. (Kaeser compressors, 2015)

### 1.2.6.1. Partículas sólidas

De acuerdo con Atlas Copco Venezuela S.A., las partículas sólidas son todos los sólidos en suspensión que pueda tener el aire y que provienen principalmente de tres fuentes:

- Del aire atmosférico succionado, en el cual se encuentra una gran concentración.
- Del compresor propiamente, cuando el aceite de lubricación se descompone.
- De la red neumática, cuando el material de la tubería es propensa a oxidarse.

A continuación, en la figura 4 se detalla la clasificación de las partículas sólidas según su tamaño.

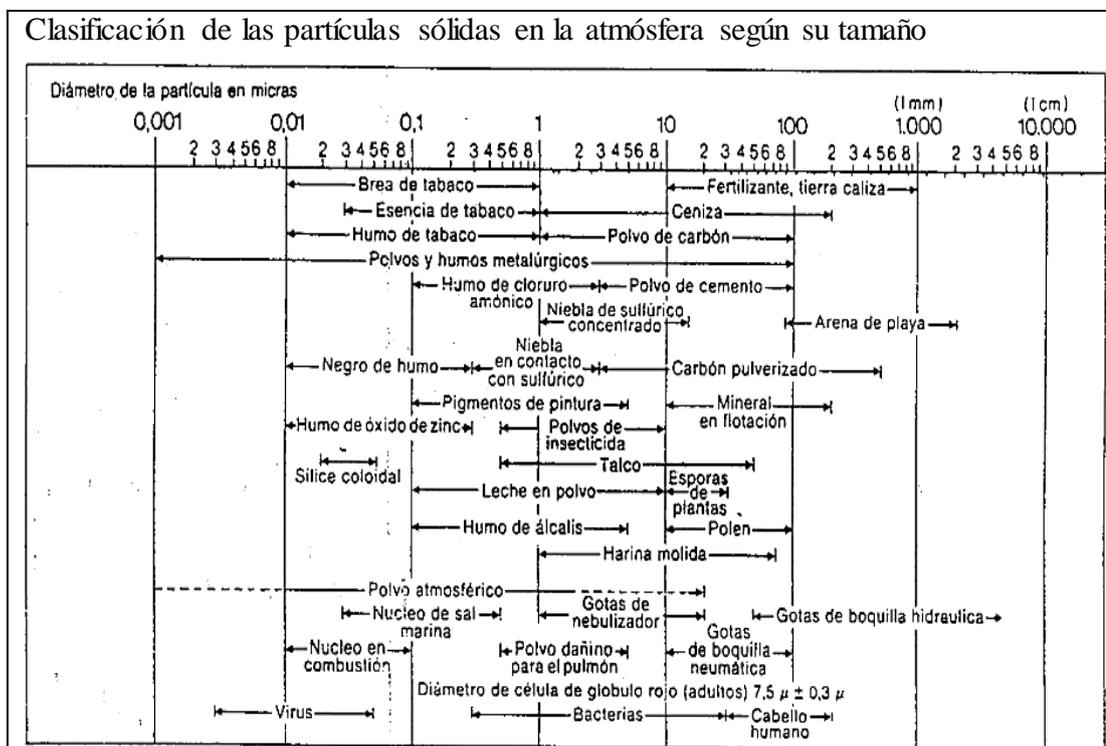


Figura 4. Clasificación de las partículas sólidas en la atmósfera según su tamaño  
Fuente: Atlas Copco Venezuela (pág. 79)

La existencia de estas partículas en el fluido produce un desgaste prematuro de la máquina neumática y lo contamina de diversas maneras.

### **1.2.6.2. Aceite contenido en el aire comprimido**

El aceite proviene en su gran mayoría del compresor, cuando éste tiene cámara de compresión lubricada. Y en cantidad insignificante se encuentra en la atmósfera en forma de neblina o vapor.

Los compresores rotativos de paletas y tornillos, inundan la cámara de compresión con aceite, pero siempre tienen un separador de alta eficiencia que disminuye el contenido de aceite a unos 60 y 15 mg/m<sup>3</sup> respectivamente.

El aceite que pase a la red de aire comprimido se encontrará completamente degradado, sin su característica de lubricadora y con el grado de acidez y corrosión muy alto. Tornándose un contaminante en forma de sustancias: sólida, líquida y gaseosa (Atlas Copco Venezuela, S.A.).

### **1.2.6.3. Humedad del aire**

El aire es capaz de retener una cierta cantidad de vapor de agua, la cantidad dependerá de la humedad atmosférica y de la temperatura. Además SMC Internacional Training (2002, pág. 20) menciona que “1 m<sup>3</sup> de aire comprimido es capaz de retener sólo la misma cantidad de vapor de agua como 1 m<sup>3</sup> de aire a presión atmosférica”.

El aire atmosférico tiende a no estar saturado, por tal motivo se puede obtener un coeficiente entre el contenido real del agua y el del punto de condensación. Tal valor indicado en porcentaje es llamado como humedad relativa y se la expresa de la siguiente manera, según (SMC Internacional Training, 2002)

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{contenido real de agua}}{\text{cantidad de saturación}} \times 100 \quad [\text{Ecuación 4}]$$

“Cuando el aire se comprime, su capacidad para contener humedad en forma de vapor es sólo la de su volumen reducido. Por tanto, a menos que la temperatura suba sustancialmente, el agua será expulsada mediante condensado.” (SMC Internacional Training, 2002, pág. 23)

A continuación se observará la tabla 1, que proporciona valores exactos de la cantidad de gramos de agua por metro cúbico. La columna central muestra el contenido

en un metro cúbico estándar y a la derecha el contenido en un volumen de un metro cúbico a la temperatura dada.

Tabla 1.  
Saturación del aire por agua (Punto de condensación)

| Temperatura °C | g / m <sup>3</sup> (estándar) | g / m <sup>3</sup> (atmosférico) |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------|
| - 40           | 0,15                          | 0,18                             |
| - 35           | 0,25                          | 0,29                             |
| - 30           | 0,40                          | 0,45                             |
| - 25           | 0,64                          | 0,70                             |
| - 20           | 1,00                          | 1,08                             |
| - 15           | 1,52                          | 1,61                             |
| - 10           | 2,28                          | 2,37                             |
| - 5            | 3,36                          | 3,42                             |
| 0              | 4,98                          | 4,98                             |
| 5              | 6,99                          | 6,86                             |
| 10             | 9,86                          | 9,51                             |
| 15             | 13,76                         | 13,04                            |
| 20             | 18,99                         | 17,69                            |
| 25             | 25,94                         | 23,76                            |
| 30             | 35,12                         | 31,64                            |
| 35             | 47,19                         | 41,83                            |
| 40             | 63,03                         | 54,108                           |

Nota: En la tabla se puede observar la máxima cantidad de agua que puede contener el aire atmosférico saturado, cuando es sometido a diferentes temperaturas.

Fuente: SMC Internacional Training (2002, pág. 22)

Otra razón por la que se produce condensación es porque la temperatura del aire disminuye hasta el punto de rocío. El punto de rocío se refiere a la temperatura T, en la cual el aire llega al punto de saturación, es decir, se vuelve aire saturado.

Por tal motivo cuando el aire comprimido se somete a un proceso de enfriamiento, el punto de condensación (humedad de saturación) irá disminuyendo coincidiendo con el contenido real de agua y así la humedad relativa alcanzará hasta el 100%. La temperatura T evidenciada en ese momento corresponderá con el valor del punto de rocío. Así pues, mientras más bajo sea el punto de rocío, el aire será más seco y por ende de mejor calidad. (SMC Internacional Training, 2002)

#### **1.2.6.4. Norma ISO 8573-1:2010**

La norma ISO 8573 - 1:2010 fue desarrollada como referencia para ayudar a los ingenieros de planta a especificar la calidad de aire comprimido para partículas

sólidas, humedad y aceite. En la figura 5 se muestran diferentes calidades de aire bajo la norma en mención y ejemplos de aplicaciones neumáticas. Y con más detalle en el anexo 1.

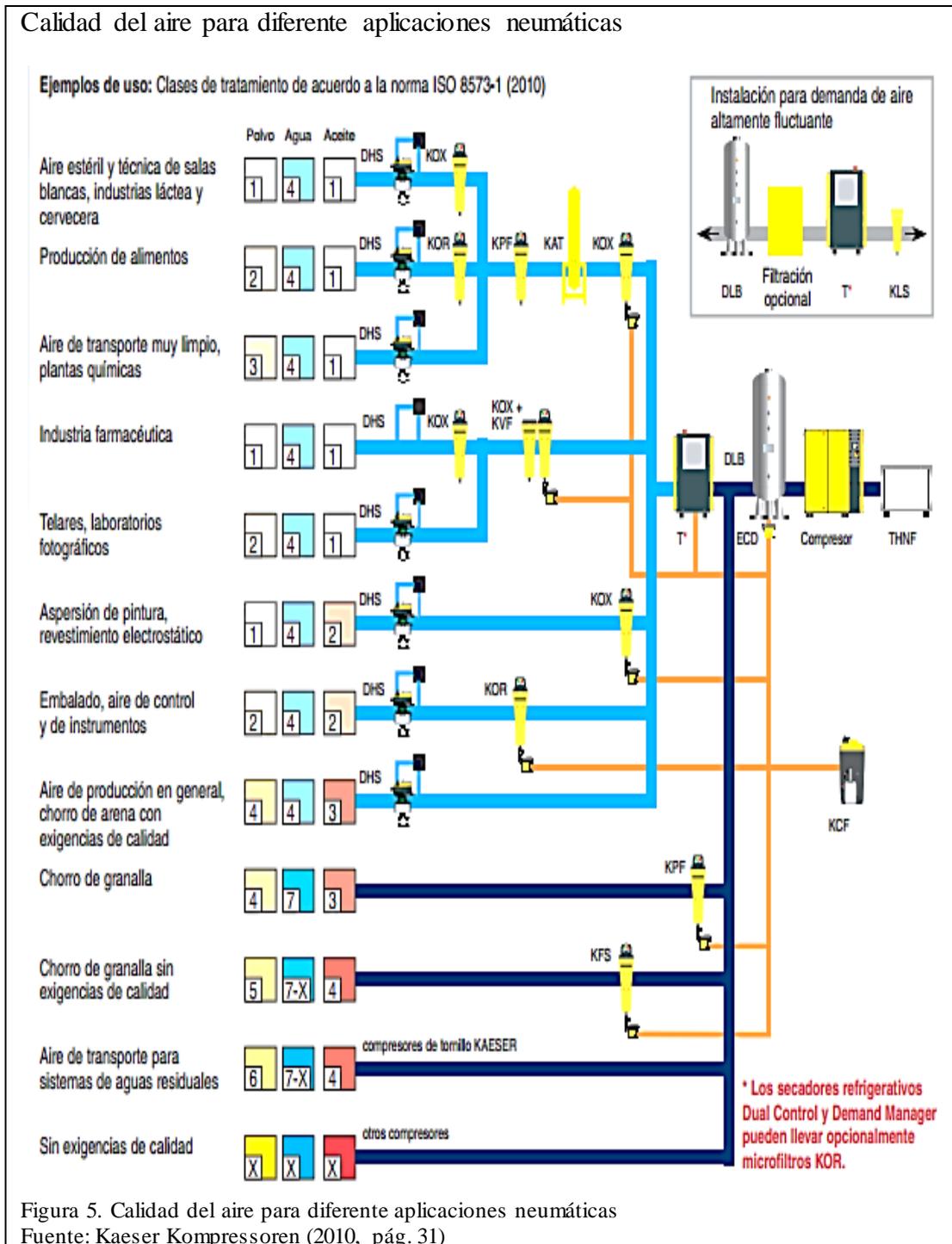


Figura 5. Calidad del aire para diferente aplicaciones neumáticas  
Fuente: Kaeser Kompressoren (2010, pág. 31)

Esta norma califica la calidad del aire de acuerdo a los valores de suciedad (por el tamaño de las partículas sólidas suspendidas y su concentración), de agua (según el punto de rocío a presión alcanzado y el contenido de vapor de agua presente en el aire)

y de aceite (por la concentración total de aceite presente en el aire en forma de aerosoles, líquidos o vapores). En la tabla 2 se puede identificar las clases dependiendo de la cantidad de partículas, agua y aceite que se encuentre en el aire presurizado.

Tabla 2.  
Clases de calidad del aire comprimido según la norma ISO 8573-1 (2010)

| <b>Partículas / polvo</b> |  |               |               |
|---------------------------|--|---------------|---------------|
| Clase                     | No. máx. de partículas por m <sup>3</sup> (35.31 cf)<br>Tamaño de partículas en µm * |               |               |
|                           | 0,1 ≤ d ≤ 0,5  | 0,5 ≤ d ≤ 1,0 | 1,0 ≤ d ≤ 5,0 |
| 0                         | Por ejemplo, como aire esteril y para salas blancas; consulte a KAESER               |               |               |
| 1                         | ≤ 20.000   | ≤ 400         | ≤ 10          |
| 2                         | ≤ 400.000  | ≤ 6.000       | ≤ 100         |
| 3                         | no definido  | ≤ 90.000      | ≤ 1.000       |
| 4                         | no definido  | no definido   | ≤ 10.000      |
| 5                         | no definido  | no definido   | ≤ 100.000     |
| Clase                     | Concentración de partículas C <sub>p</sub> en mg/m <sup>3</sup> (mg/35.31 cf)        |               |               |
| 6                         | 0 < C <sub>p</sub> ≤ 5   |               |               |
| 7                         | 5 < C <sub>p</sub> ≤ 10  |               |               |
| X                         | C <sub>p</sub> > 10  |               |               |
| <b>Agua</b>               |  |               |               |
| Clase                     | Punto de rocío de presión  |               |               |
| 0                         | Por ejemplo, como aire esteril y para salas blancas; consulte a KAESER               |               |               |
| 1                         | ≤ - 70 °C(-94 °F)  |               |               |
| 2                         | ≤ - 40 °C(-40 °F)  |               |               |
| 3                         | ≤ - 20 °C(-4 °F)   |               |               |
| 4                         | ≤ + 3 °C(+38 °F)   |               |               |
| 5                         | ≤ + 7 °C(+45 °F)   |               |               |
| 6                         | ≤ + 10 °C(+50 °F)  |               |               |
| Clase                     | Remanente de agua líquida C <sub>w</sub> en g/m <sup>3</sup> (g/35.31cf) *           |               |               |
| 7                         | C <sub>w</sub> ≤ 0,5   |               |               |
| 8                         | 0,5 < C <sub>w</sub> ≤ 5   |               |               |
| 9                         | 5 < C <sub>w</sub> ≤ 10  |               |               |
| X                         | C <sub>w</sub> > 10  |               |               |
| <b>Aceite</b>             |  |               |               |
| Clase                     | Remanente de aceite total (líquido, aerosol + gas) [mg/m <sup>3</sup> (mg/35.31cf)]* |               |               |
| 0                         | Por ejemplo, como aire esteril y para salas blancas; consulte a KAESER               |               |               |
| 1                         | ≤ 0,01   |               |               |
| 2                         | ≤ 0,1  |               |               |
| 3                         | ≤ 1,0  |               |               |
| 4                         | ≤ 5,0  |               |               |
| X                         | > 5,0  |               |               |

\*) En condiciones de referencia: 20 °C (68 °F), 1 bar(abs)(14.5 psia), 0% de humedad relativa

Nota: En la tabla se detallan las diferentes clases de calidad de aire, de acuerdo con la cantidad y el tamaño de partículas sólidas, punto de rocío y remanentes de aceite, contenidas en el aire comprimido. Fuente: Kaeser compressors (2015, pág. 39)

Así pues, para designar la clase de pureza del aire comprimido se debe seguir el siguiente formato:

ISO 8573-1 X.Y.Z

Donde:

**X** es la cifra que indica la clase de partículas sólidas, según la Tabla anterior,  
**Y** es la cifra que indica la clase de humedad, según la Tabla anterior,  
**Z** es la cifra que indica la clase de aceite, según la Tabla anterior.

### **1.3. Red de distribución de aire comprimido**

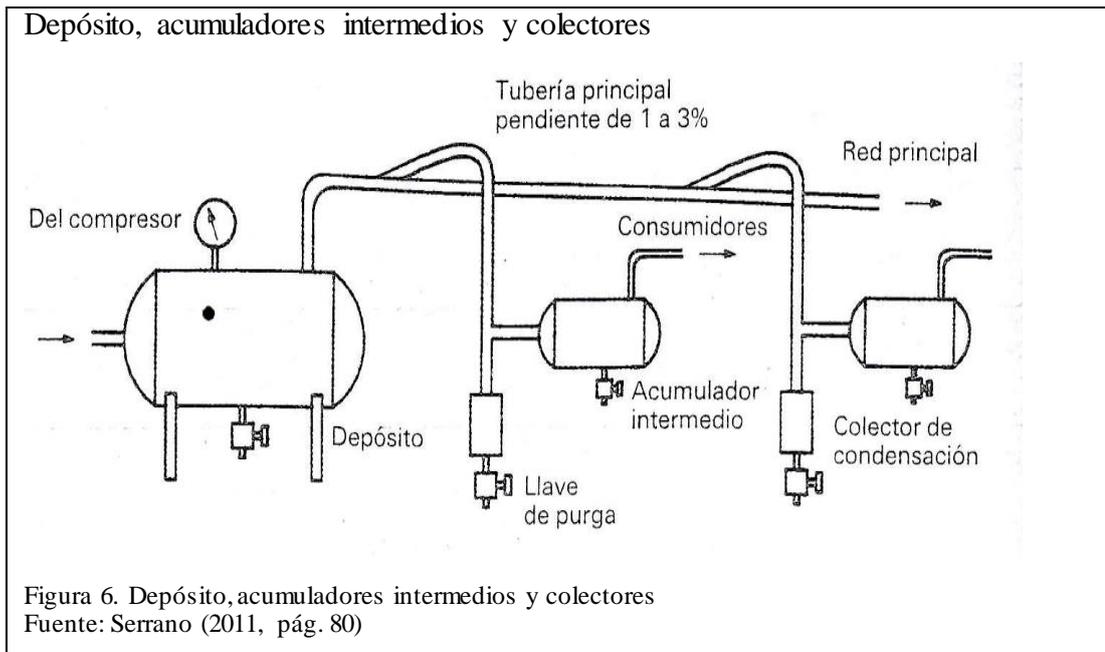
La red de distribución de aire comprimido parte desde el depósito principal, (que es el encargado de almacenar el fluido), lo conforma todas las tuberías que conducen el aire a presión hasta el lugar de trabajo y los accesorios utilizados para tal fin.

Según Majumdar (1998), para la realización de las instalaciones se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- ❖ Presión de aire en la línea y velocidad del mismo.
- ❖ Gasto total a través de la línea.
- ❖ Caída de presión admisible en la línea.
- ❖ Tipo del material del tubo y tipos de accesorios de la línea.
- ❖ Longitud y diámetro del tubo o de otras tuberías.
- ❖ Medio ambiente de trabajo.

#### **1.3.1. Depósitos de aire comprimido**

Un sistema de aire comprimido debe estar constituido por un depósito principal y por acumuladores intermedios, estos últimos de ser necesarios. A continuación en la figura 6 se detallan los diferentes depósitos en una red de distribución.



### 1.3.1.1. Depósito principal

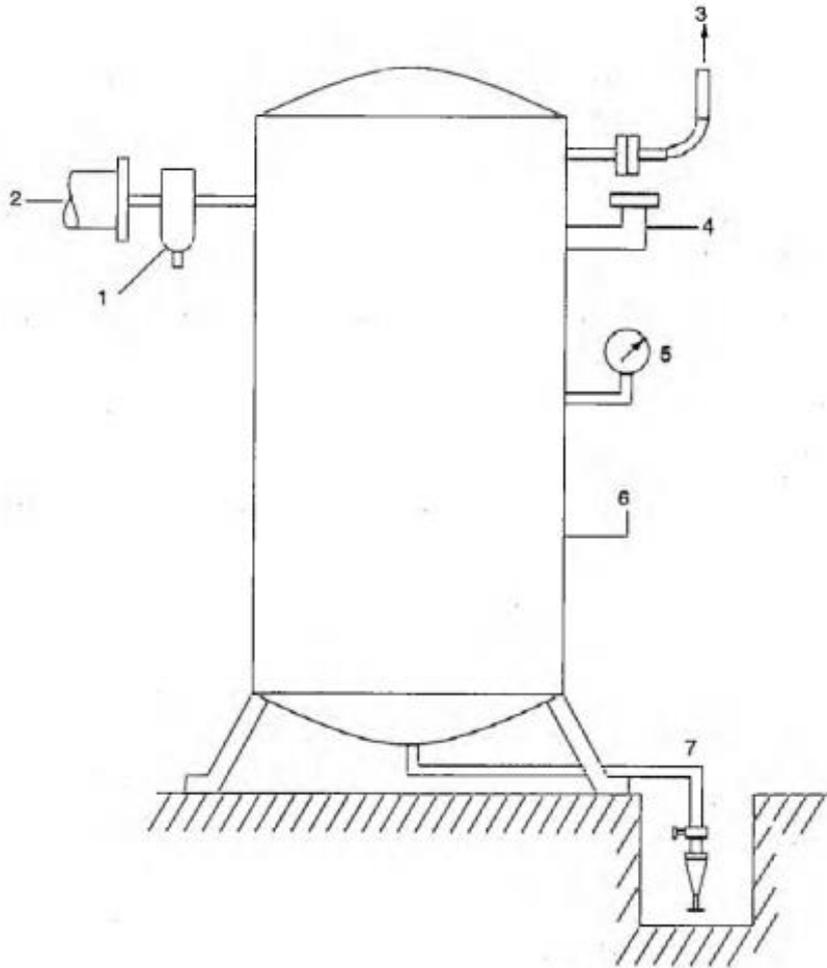
Serrano (2011), explica que este elemento principal de almacenaje del aire a presión debe estar situado cerca de los generadores (compresores). Y es el responsable de cumplir varias funciones en la red de abastecimiento, que son las siguientes:

- ❖ Acumular gran cantidad del fluido a presión para ser capaz de mantener durante un cierto tiempo en marcha los equipos neumáticos, (en caso de detenerse los compresores) y para evitar los arranques frecuentes de los motores de los compresores.
- ❖ Absorber las fluctuaciones de presión originadas por los generadores de presión o por el consumo de los actuadores.
- ❖ Refrigerador del aire, pues la gran superficie del elemento que tiene contacto con el gas contribuye enormemente al enfriamiento y a que se produzca el condensado del agua que está en estado gaseoso. Para ello debe ser instalado en un lugar protegido del sol y con una buena ventilación.

Además, en el fondo del depósito se debe instalar una llave de purga que puede ser manual o automática para evacuar el agua condensada.

En la siguiente figura 7 se muestra el esquema de un taque principal y de los elementos que lo conforman.

### Tanque para el aire comprimido



**Fig. 3.9** Tanque para el aire comprimido: 1. Separador del agua, 2. Intercambiador de calor, 3. Aire hacia la línea, 4. Válvula de seguridad, 5. Manómetro, 6. Tanque de almacenamiento, 7. Drenaje para el agua

Figura 7. Tanque para el aire comprimido  
Fuente: Majumdar (1998, pág. 57)

El depósito lo debe conformar la válvula de seguridad, manómetro, purga y tapas de inspección para su limpieza interior. (SMC Internacional Training, 2002)

#### **1.3.1.2. Dimensionamiento del depósito**

El tamaño del depósito principal depende de la capacidad del compresor y del consumo general de la planta. El cálculo del mismo se lo debe realizar con cierto grado de sobre-dimensionamiento, para poder abastecer posibles ampliaciones y porque mientras mayor es el depósito, la frecuencia de funcionamiento del generador de aire a presión será menor. (Serrano, 2011)

De acuerdo con Atlas Copco Venezuela, S.A.:

Para el cálculo de volumen del depósito (recibidor o tanque principal), de aire a presión puede emplearse la siguiente fórmula:

$$V = \frac{0.25 \times Q_c \times P_1 \times T_0}{f_{max} \times \Delta P \times T_1} \quad (\text{pág. 141}) \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

- ❖  $\Delta P$  = Ajuste del presostato ( $p_u - p_1$ ) [Bar]
- ❖  $p_u$  = Presión de descarga o parada [Bar (e)]
- ❖  $p_1$  = Presión de carga o arranque [Bar (e)]
- ❖  $P_1$  = Presión de entrada [Bar (abs)]
- ❖  $T_0$  = Temperatura en el recibidor (tanque) [°K]
- ❖  $T_1$  = Temperatura de entrada [°K]
- ❖  $Q_c$  = Caudal suministrado por el compresor en  $[\frac{m^3}{s}]$
- ❖  $f_{max.}$  = Frecuencia del ciclo. Se recomienda: (1/30)
- ❖  $V$  = Volumen del recibidor [ $m^3$ ]

El volumen resultante debe ser ajustado a los tamaños normalizados del mercado.

### 1.3.2. Distribución del aire comprimido

En el documento Aire comprimido y sus aplicaciones en la industria, Atlas Copco Venezuela, S.A., explica que el propósito de la instalación de un sistema de aire comprimido es suministrar aire en cada punto de consumo determinado, satisfaciendo sus demandas en cuanto a:

- ✓ Presión de trabajo.
- ✓ Flujo de aire presurizado.
- ✓ Calidad de aire presurizado.

Que se cumplirán con el menor costo de inversión y con una eficiente configuración de los cuatro componentes de la red de aire comprimido, que son los siguientes y que se detallan en la figura 8:

- La línea principal: responsable de conducir el aire desde el cuarto de compresores hasta el área de consumo.
- La línea de distribución o secundaria: encargada de distribuir el aire dentro del área de consumo.

- La línea de servicio: conduce el aire desde la línea de distribución al punto de trabajo.
- Accesorios de línea: son todos los elementos como válvulas, conexiones, unidades de preparación de aire, etc, que se encuentran a lo largo de la red de distribución.

Partes principales de un sistema de distribución de aire comprimido

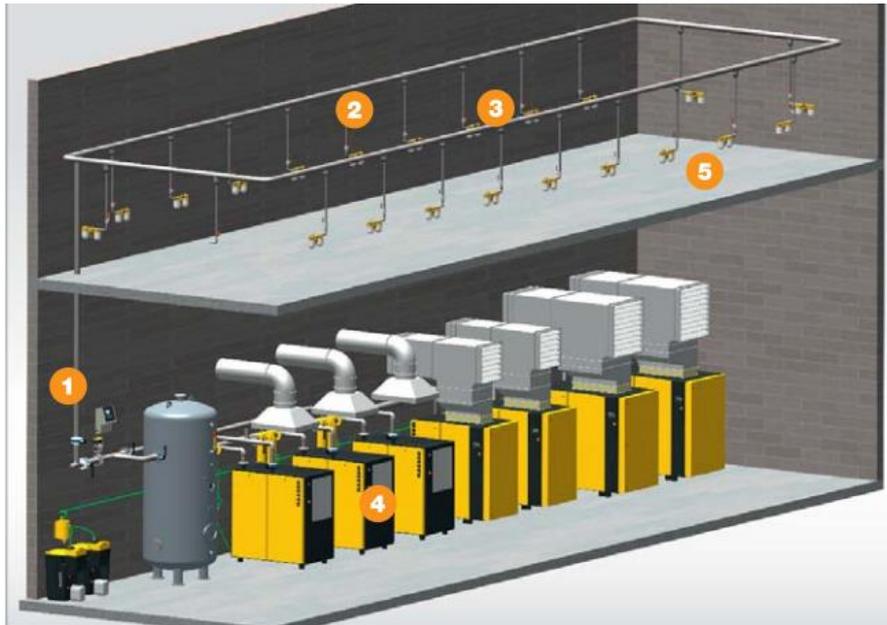
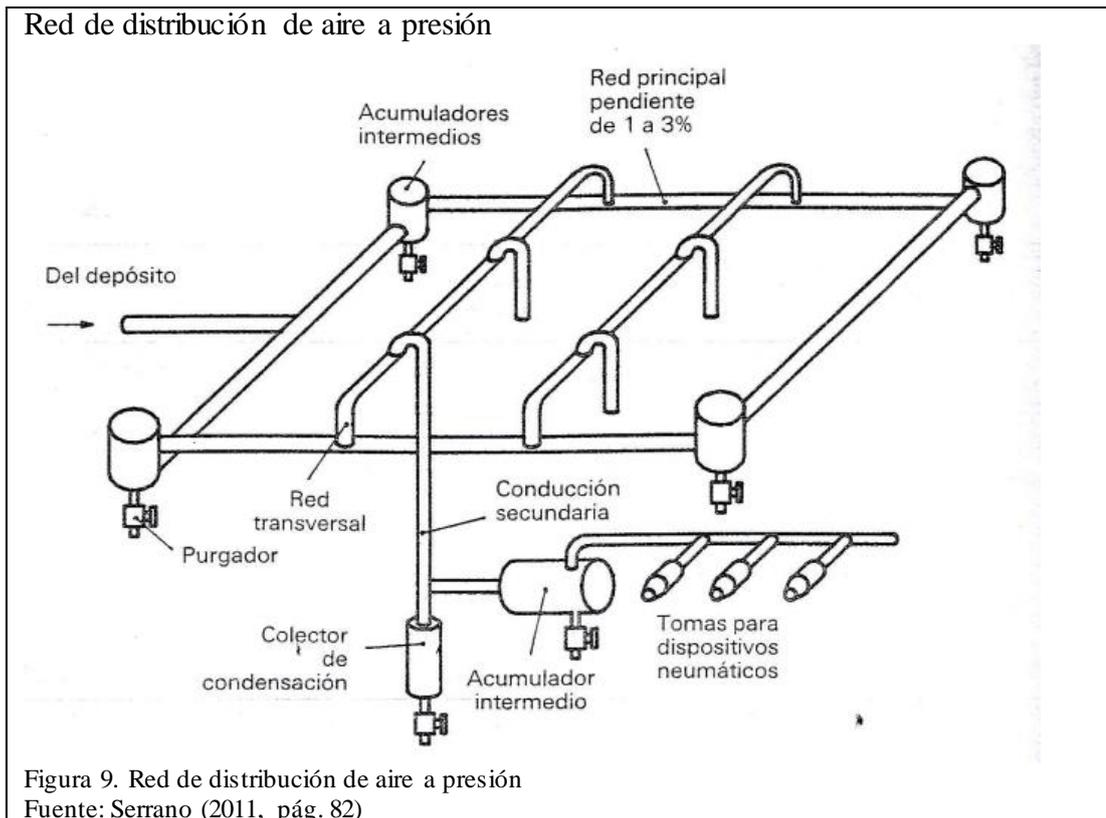


Figura 2: Partes principales de un sistema de distribución de aire comprimido: Tubería principal (1), tubería de distribución (2), tubería de conexión (3), secador (4), Unidad de tratamiento/manguera (5)

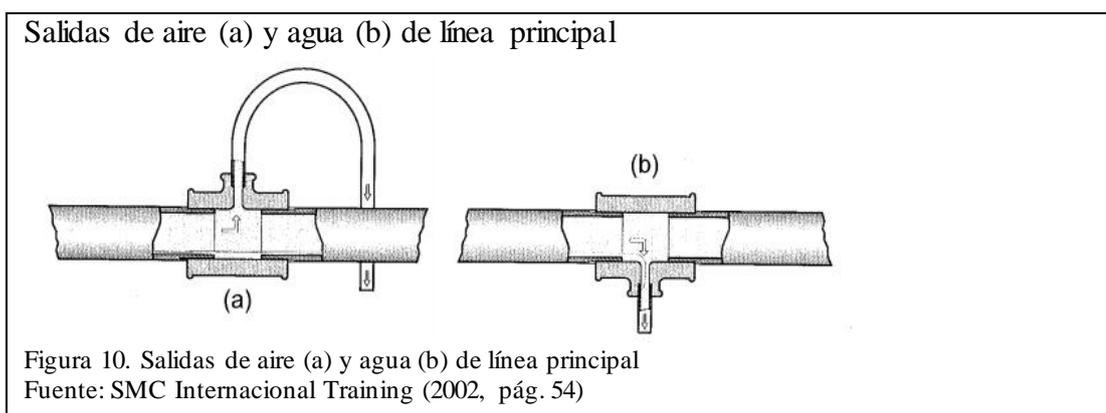
Figura 8. Partes principales de un sistema de distribución de aire comprimido  
Fuente: Kaeser Kompressoren (2010, pág. 23)

Además en las líneas principal y secundaria, la velocidad del aire debe oscilar entre 6 y 10  $\frac{m}{s}$ , evitando el valor superior y en las líneas de servicio no debe exceder los 20  $\frac{m}{s}$ . (SMC Internacional Training, 2002)

En la figura 9 se detalla una correcta red de distribución, y también se muestra la pendiente para la red principal que es del 1 al 3 % de la longitud en línea recta, cuyo valor inferior (1%) será tomado en cuenta para el desarrollo del rediseño.



La red actúa como una superficie refrigerante, provocando que el agua y el aceite se acumulen a lo largo de su longitud. Por tal motivo las líneas secundarias se toman de la parte superior del ducto, mediante los llamados cuellos de ganso, como se muestra en la figura 10, impidiendo que por gravedad el condensado de la línea principal vaya a la máquina. Y para eliminarla se instalan accesorios “T” que apunten hacia abajo en lugares estratégicos. (SMC Internacional Training, 2002)



Además se instalan válvulas para dividir las líneas en secciones, con el fin de limitar el área que requiera ser vaciada para actividades de mantenimiento. Y se debe evitar cambios bruscos en la sección de la tubería, codos cerrados y cualquier elemento que ayude a aumentar la caída de presión. (Serrano, 2011)

De acuerdo con SMC Internacional Training (2002), existen dos configuraciones para una red: final en línea muerta y conducto principal en anillo.

### **1.3.2.1. Final en línea muerta**

Para favorecer el drenaje, las tuberías de trabajo tienen una pendiente de cerca del 1% en la dirección del fluido y deberán ser adecuadamente purgadas. A intervalos ajustables, la línea principal puede ser devuelta a su altura original mediante dos largos tubos curvados en ángulo recto y disponiendo una derivación de purga en el punto más bajo. (Majumdar, 1998, pág. 52)

Configuración de línea principal con final en línea muerta

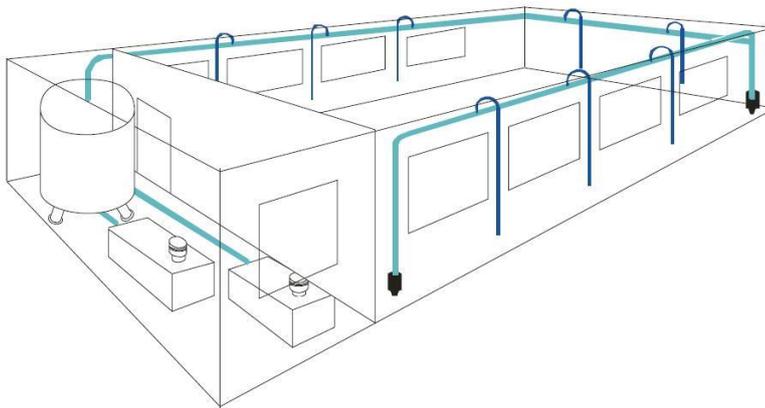


Figura 11. Configuración de línea principal con final en línea muerta  
Fuente: SMC Internacional Training (2002, pág. 53)

### **1.3.2.2. Conducto principal en anillo**

Mediante esta configuración de red presentada en la figura 12, es posible alimentar al consumidor por dos lados, lo que permite minimizar la caída de presión. (SMC Internacional Training, 2002).

Configuración de línea principal en anillo

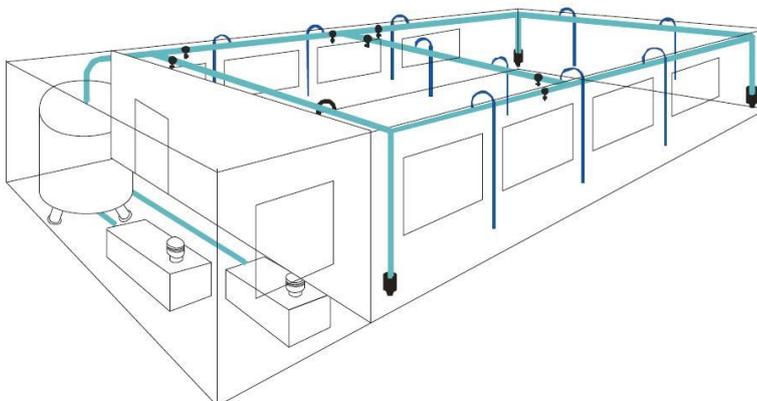


Figura 12. Configuración de línea principal en anillo  
Fuente: SMC Internacional Training (2002, pág. 53)

### 1.3.3. Caída de presión en la red de distribución

En el libro *Sistemas neumáticos*, Majumdar explica que:

Al tender el sistema de tuberías del aire comprimido, el único factor al que se le debe dar una importancia primordial es el de reducir la caída en la presión en el extremo más alejado de la tubería. Esto es muy importante para el uso económico global del aire comprimido. Con el fin de lograrlo, es esencial que se use el tipo de tubería de circuito cerrado. (1998, pág. 14)

Además según Serrano (2011), las pérdidas dependen de muchos factores:

- ❖ Diámetro de las tuberías.
- ❖ Longitud de las tuberías.
- ❖ Rugosidad superficial de la pared interior de la tubería.
- ❖ Cambios bruscos en la sección de la tubería.
- ❖ Cambios bruscos en la dirección del fluido (codos cerrados).
- ❖ Sección de las válvulas de paso.

Por último, según: Kaeser Kompressoren (2010), en un sistema de aire comprimido optimizado se dan comúnmente las siguientes pérdidas de presión:

|                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| Red principal:                   | 0.03 bar |
| Red de distribución:             | 0.03 bar |
| Red de servicio:                 | 0.04 bar |
| A estas pérdidas deben añadirse: |          |
| Secador:                         | 0.2 bar  |
| Unidad manten./manguera:         | 0.5 bar  |
| Total:                           | 0.8 ba   |

### 1.3.4. Dimensionamiento de la tubería del sistema de aire comprimido

Para estimar la sección necesaria en las tuberías deben tenerse en cuenta factores tales como: caudal circulante del aire, velocidad del mismo, pérdidas admisibles de presión, presión de trabajo en los consumidores, estrangulaciones existentes en toda la conducción y la longitud de la tubería. (Serrano, 2011, págs. 81, 82)

En el libro *Neumática e hidráulica* (2007), el autor Creus, realiza el procedimiento que a continuación se detallará desde el subcapítulo 1.3.4.1 hasta el subcapítulo 1.3.4.6 para el correcto dimensionamiento de la tubería:

#### 1.3.4.1. Determinación de los parámetros técnicos para el cálculo

- Presión de trabajo. Se determina cuál es la presión más elevada de todas las máquinas que trabajan con aire comprimido, cuyo valor será la presión de trabajo en la red.
- Pérdida de carga máxima. Como se mencionó anteriormente las caídas de presión desde el compresor hasta los dispositivos de consumo, deben estar dentro de los parámetros establecidos.
- Consumo de aire de cada máquina o unidad. Esta información se la puede adquirir en los catálogos de cada máquina.
- Factor de uso de cada máquina. Es el porcentaje de tiempo en que la máquina ésta consumiendo aire, es decir, la duración de conexión y que es propio de cada máquina.
- Factor de simultaneidad. Este valor varía dependiendo del número de unidades que se encuentran consumiendo el fluido, es un valor empírico. Y se lo puede obtener mediante la siguiente curva presentada en la figura 13 o en la tabla 3.

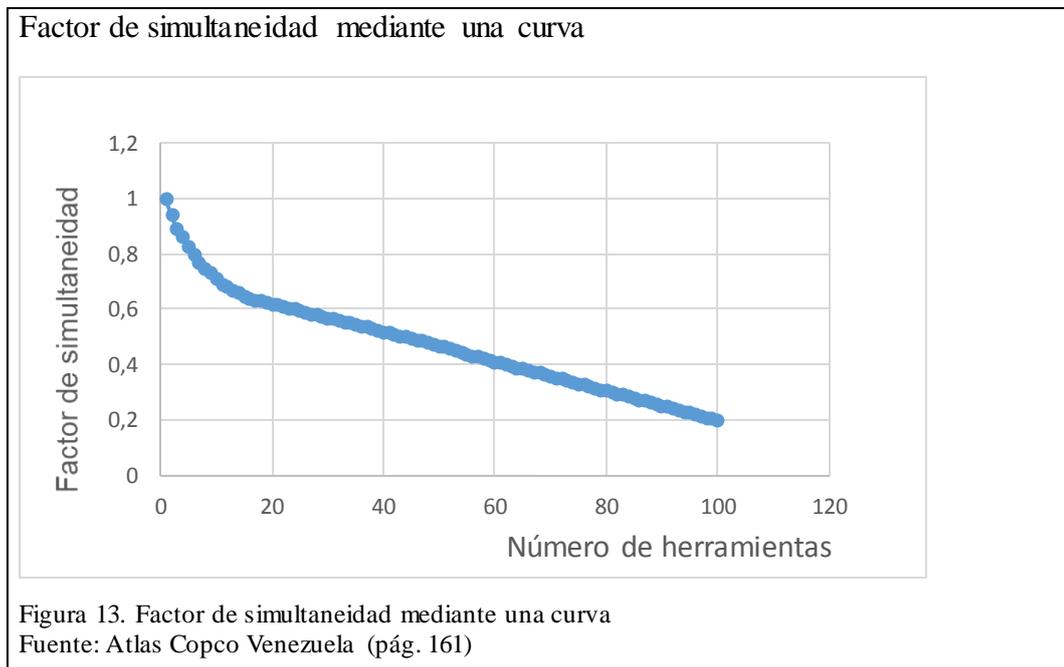


Tabla 3.  
Factor de simultaneidad mediante una tabla

| Cantidad de unidades consumidoras | Factor de simultaneidad | Cantidad de unidades consumidoras | Factor de simultaneidad |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1                                 | 1                       | 9                                 | 0,73                    |
| 2                                 | 0,94                    | 10                                | 0,71                    |
| 3                                 | 0,89                    | 11                                | 0,69                    |
| 4                                 | 0,86                    | 12                                | 0,68                    |
| 5                                 | 0,83                    | 13                                | 0,67                    |
| 6                                 | 0,80                    | 14                                | 0,66                    |
| 7                                 | 0,77                    | 15                                | 0,65                    |
| 8                                 | 0,75                    | 100                               | 0,20                    |

Nota: En la tabla se detalla el factor de simultaneidad de acuerdo a la cantidad de unidades consumidoras.

Fuente: Festo AG & Co. (2002, pág. 65)

#### 1.3.4.2. Cálculo del consumo total de aire de la planta de producción (Caudal total)

En primer lugar se debe transformar todas las unidades (de caudal volumétrico) de los consumidores que se encuentra en condiciones Normales a unidades F.A.D. con la ayuda de la ecuación 2, expuesta anteriormente. Unificándolas, porque solo así, se podrá emplear la siguiente fórmula:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n (N^{\circ} \text{unid.} \times Q \text{ de cada unid.}) \times F. \text{ de uso (\%)} \times F. \text{ simultaneidad}$$

(Creus, 2007, pág. 147) [Ecuación 6]

Donde:  $Q_T$  = Caudal total calculado en  $\left(\frac{l}{s}\right)$  y  $Q$  = Caudal de cada máquina o unidad en  $\left(\frac{l}{s}\right)$

Sin embargo, se debe tomar en cuenta las posibles ampliaciones de la instalación y las posibles fugas (tolerancias permisibles), el caudal debe ser corregido mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{corregido}} \left(\frac{l}{s}\right) = (Q_T + (Q_T \times \% \text{ Reserva}) + (Q_T \times \% \text{ Reserva} \times \% \text{ Fugas})) \times 2$$

(Creus, 2007, pág. 147) [Ecuación 7]

Donde: % Reserva (o tolerancia por ampliación), se determina por la proyección de crecimiento de la empresa.

En cuanto al porcentaje de fugas (o tolerancia por fugas), según el artículo publicado por UPME, Colciencias, se considera que en una planta con un buen

mantenimiento y un adecuado programa de control de fugas. Las pérdidas por fugas deben estar entre el 5 y el 10% de la producción de los compresores.

“El factor 2 tiene la finalidad de compensar los picos de consumo ya que por experiencia se sabe que el consumo medio de aire es entre un 20% y un 60% del consumo máximo de aire.” (Creus, 2007, pág. 147)

#### **1.3.4.3. Cálculo del diámetro aproximado de tubería para la red de aire**

Se tomará como referencia la fórmula expuesta por Majumdar (1998), quién explica que debido a la fricción del flujo en el interior de la tubería y a otras pérdidas y resistencias, siempre existe una caída en la presión del aire saliente. Y es por esta razón que se han aplicado diversas fórmulas empíricas para calcular la caída de presión. A continuación se presenta una fórmula muy común:

$$\Delta P = (1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{d^5 \times P_{\text{trabajo}}}) \quad \text{[Ecuación 8]}$$

De esta ecuación, Kaeser Kompressoren (2010), en su publicación Técnicas de aire comprimido, expone una fórmula de aproximación para calcular el diámetro interior de tubería para la red que es la siguiente:

$$d = \sqrt[5]{(1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{\Delta P \times P_{\text{trabajo}}})} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Dónde:  $d$ , es el diámetro interior de la tubería en [m]

$Q_{\text{corregido}}$ , es el caudal total corregido en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$L_{\text{tubería}}$ , es la longitud de tubería en [m]

$\Delta P$ , es la caída de presión en [Pa]

$P_{\text{trabajo}}$ , es la presión absoluta del sistema en [Pa]

Además se debe tomar en cuenta lo siguiente:

La presión del sistema, se determina al realizar la recopilación de datos de todas las máquinas que necesitan de aire comprimido. (Presión de trabajo y consumo del fluido en mención, de cada máquina.). Sin embargo, como se necesita de la presión absoluta del sistema, lo que se debe realizar es emplear la fórmula que presenta Atlas Copco Airpower NV, (2010):

$Presión\ absoluta = Presión\ relativa + Presión\ atmosférica.$  [Ecuación 10]

Donde, la presión relativa es la presión de trabajo o presión del sistema y la presión atmosférica dependerá del lugar geográfico en el que se encuentre el compresor, es decir, a que altura sobre el nivel del mar se encuentra; en este caso Quito – Ecuador.

La altitud de Quito varía desde los 1.533 metros (5.029 pies) hasta los 3.777 (12.391 pies) sobre el nivel del mar. El área urbana del Distrito Metropolitano de Quito tiene una altura promedio de 2.850 metros (9.350 pies). Tomando como referencia los 2.850 m.s.n.m. su presión atmosférica es de 0,717 [bar].

Por tanto la presión absoluta del sistema es:  $(0,717 + Presión\ relativa)$  [bar]

El Caudal total corregido se lo obtendrá con los datos recopilados de los caudales de consumo de cada máquina y al determinar los distintos factores y las distintas tolerancias de fugas y ampliación. Con estos datos bastará desarrollar las fórmulas expuestas anteriormente, para el cálculo del caudal.

Para obtener la longitud de tubería se debe tener un bosquejo de la distribución del aire en la nave industrial y se debe tener diferenciado los cuatro componentes de la red: línea principal, línea de distribución, líneas de servicios y los accesorios. Pues se empezará con el cálculo del diámetro más grande (línea principal), luego con la línea de distribución y por último con las líneas de servicio. Y para poder realizarlo se debe conocer la trayectoria y la longitud (distancia recorrida) de las líneas en mención.

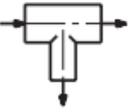
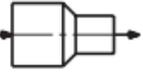
Y se debe tomar en cuenta que el fluido al transportarse por la línea principal, su presión disminuirá al llegar a la línea de distribución, produciéndose una caída de presión y de igual forma al pasar de la línea de distribución a la de servicio.

#### ***1.3.4.4. Determinar la pérdida de carga adicional que causan los accesorios en general que se instalan en la línea de suministro***

Ya obtenido el valor del diámetro interior de la tubería principal, se le aproxima a la medida inmediata superior que exista en el mercado y que se comercialice. Según Creus, (2007), el siguiente paso es determinar las cargas adicionales asumiendo que todos los componentes y accesorios colocados en la red de distribución añaden una longitud equivalente (ficticia) a la longitud total real de la tubería.

Para conocer la longitud ficticia de cada elemento se puede utilizar a continuación la tabla 4:

Tabla 4.  
Longitud equivalente de la tubería

| Denominación       | Accesorio   | Longitudes equivalentes en metros          |      |      |     |     |     |     |     |     |  |
|--------------------|---|--|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                    |   | Diámetro interior d del tubo en milímetros |      |      |     |     |     |     |     |     |  |
|                    |   | 9  | 12   | 14   | 18  | 23  | 40  | 50  | 80  | 100 |  |
| Válvula esférica   |  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 1,0 | 1,3 |  |
| Codo               |  | 0,6  | 0,7  | 1,0  | 1,3 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 6,5 |  |
| Pieza en T         |  | 0,7  | 0,85 | 1,0  | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 7,0 | 10  |  |
| Reductor de 2d a d |  | 0,3  | 0,4  | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 2,0 | 2,5 |  |

Nota: Con la ayuda de esta tabla se puede determinar las longitudes equivalentes de los accesorios presentados en la misma, de acuerdo al diámetro interior en unidades milimétricas de la tubería.  
Fuente: Festo AG & Co. (2002, pág. 70)

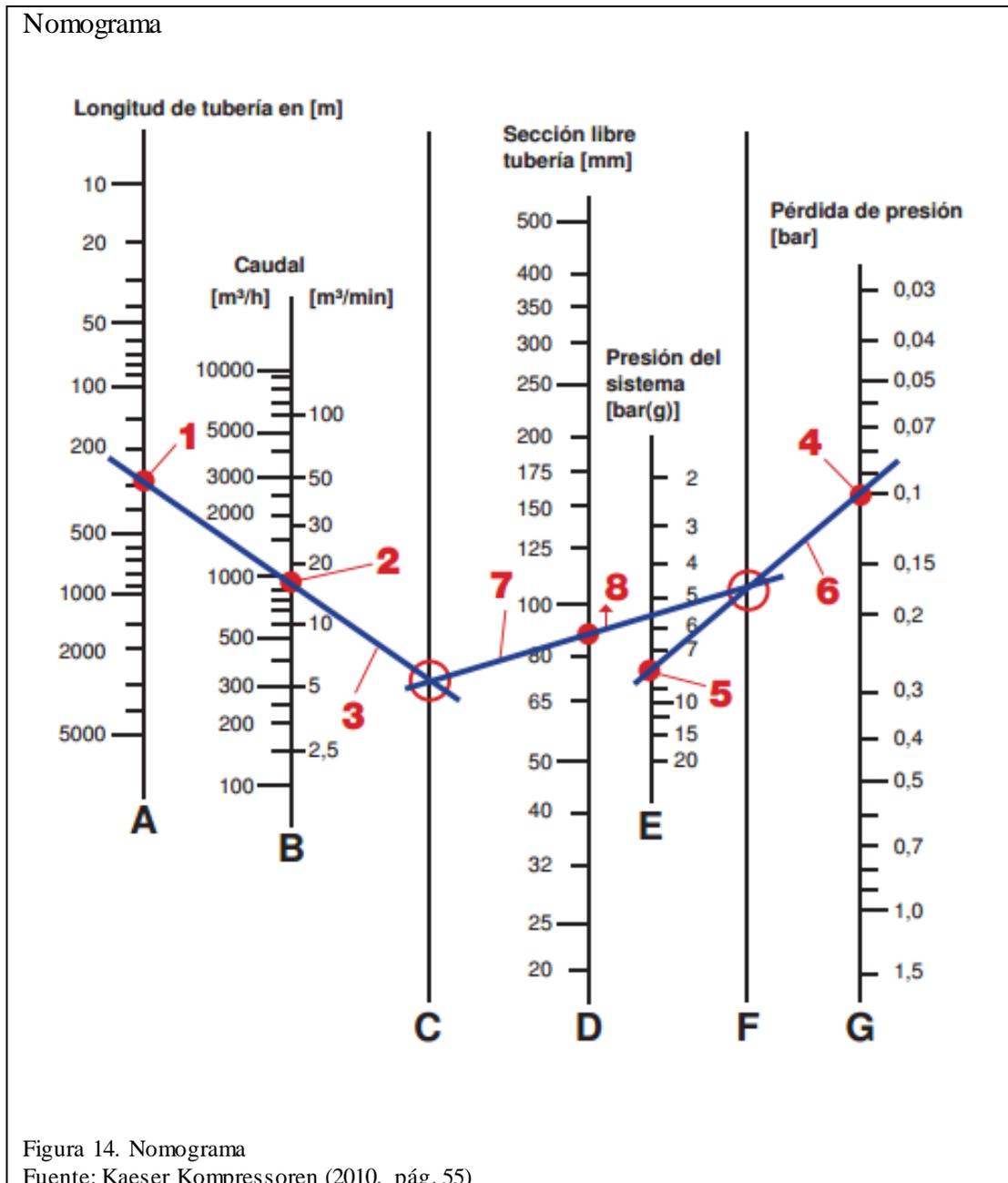
#### 1.3.4.5. Determinar y comprobación del diámetro mediante la utilización de la fórmula y un nomograma

El siguiente paso es sumar la longitud de tubería que fue obtenida del bosquejo (distancia recorrida por la red) y la longitud equivalente obtenida en el paso anterior.

Con ésta longitud se deberá obtener nuevamente el diámetro interno de las tuberías de aire comprimido mediante la ecuación 9 y se comprobará con ayuda del nomograma de la figura 14, del modo siguiente:

Primero, marque la longitud de las tuberías y el caudal en los ejes A y B. Unir ambos puntos 1 y 2 con una línea recta (3), cuya prolongación cortará el eje C en un punto. A continuación, marcar en los ejes E y G la presión mínima del sistema y la pérdida máxima de presión deseada, puntos 4 y 5. La línea recta (6) entre esos dos puntos corta el eje F. La recta (7) que une los puntos de corte de los ejes C y F corta el eje D en el punto (8) que indica el diámetro exigido para las tuberías (Atlas Copco Airpower NV, 2010).

Por último se seleccionará el diámetro de tubería que exista en el mercado. En ocasiones este diámetro de tubería es la misma que fue seleccionada en el cálculo anterior (cuando se lo realizó con la fórmula de aproximación).



**1.3.4.6. Comprobar que la caída de presión sea igual o menor a la establecida, con el diámetro seleccionado que hay en el mercado**

Para comprobar la caída de presión se debe resolver la ecuación 8, anteriormente expuesta:

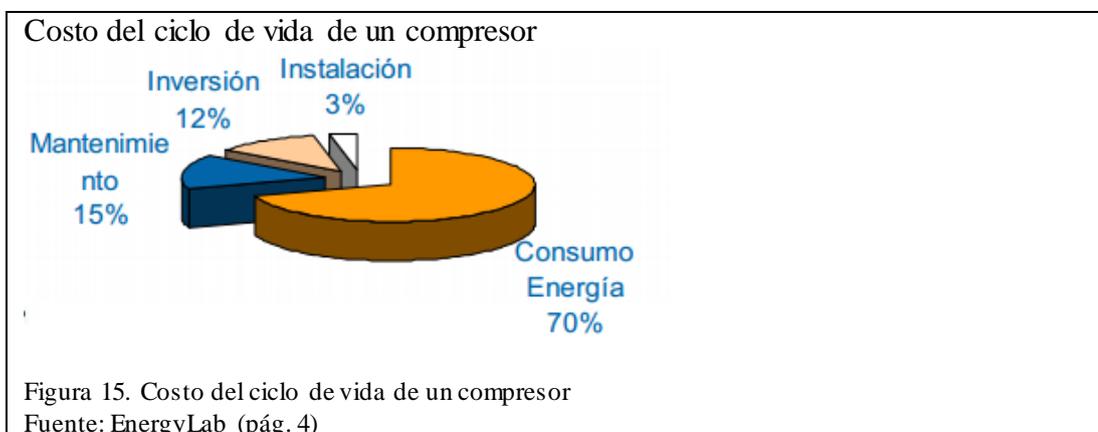
$$\Delta P = (1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{d^5 \times P_{\text{trabajo}}})$$

Este mismo procedimiento de todo el apartado 1.3.4 debe repetirse para el cálculo de cada línea: sea principal y de distribución. Para el cálculo de las líneas de servicio se excluirán el cálculo con el nomograma y lo demás será igual que para las demás líneas.

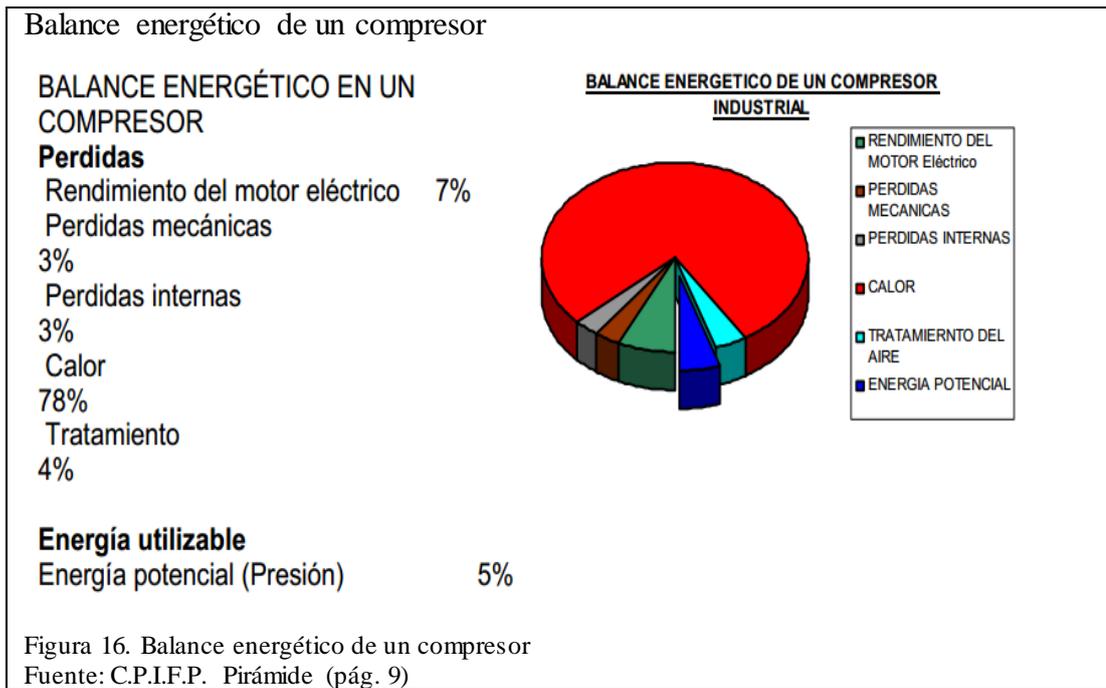
### 1.3.5. Factores importantes a tomar en cuenta en el rediseño

Factores que desde hace varios años se han venido estudiando por razones de ahorro económico, siendo el principal objetivo reducir el gasto causado por el funcionamiento del sistema que distribuye aire comprimido a la nave industrial.

Es indispensable saber qué y dónde hay que intervenir a lo largo de este sistema, empezando desde el funcionamiento del compresor hasta como es usado el fluido por parte de los consumidores. Para ello se deberá conocer el gasto económico en cada etapa durante la vida útil del compresor, información que se muestra a continuación en la figura 15.



En la figura anterior, claramente se muestra que donde más existen egresos es en el consumo de la energía y es muy relevante que el enfoque de ahorro sea en esta variable. Además hay que tomar en cuenta que del 100% de la energía eléctrica que consume un compresor solo del 5 al 10% es energía utilizada para comprimir el aire, es decir que solo ese pequeño porcentaje es energía potencial. A continuación en la figura 16 se presenta el balance energético de un compresor en el cual se puede identificar los valores antes mencionados.



Para lograr tal ahorro, la respuesta es la implementación de acciones de eficiencia energética.

UPME, Colciencias (pág. 1), explica que el mejoramiento de la eficiencia energética en estos sistemas puede permitir la reducción del 20 al 50 % del consumo de electricidad de los mismos, lo cual puede significar miles o cientos de miles de dólares de ahorros potenciales anuales. Un sistema de aire comprimido bien operado ahorra energía, reduce el mantenimiento, disminuye las interrupciones productivas, incrementa la productividad y mejora la calidad.

Acciones que de acuerdo con el Centro Público Integrado de Formación Profesional, C.P.I.F.P. Pirámide, son las siguientes:

#### ***1.3.5.1. Optimización de la presión de trabajo***

Se optimizará la presión de trabajo, reduciendo la presión artificial general de la red de aire comprimido a la entrada de cada equipo utilizando solo lo necesario. Como hacerlo:

- Conociendo la presión de trabajo de cada equipo.
- Eliminar sobrepresiones.

Pues, al reducir 1.5 bar de presión en el compresor se reduce el 20 % del consumo energético.

### ***1.3.5.2. Sectorización de las instalaciones***

Para sectorizar las instalaciones se debe independizar áreas de trabajo de la nave industrial mediante válvulas, así cuando las máquinas de una sección en particular no trabajen, se pueda cerrar el paso del aire, logrando la eliminación de fugas mediante la sectorización.

Tomar en cuenta que del consumo total del aire comprimido:

- Del 60 al 80%, es usado por los actuadores y sopladores.
- Del 20 al 40%, es eliminado por medio de las fugas.

Fugas estáticas, cuando los equipos no trabajan.

Fugas dinámicas, cuando los equipos trabajan.

### ***1.3.5.3. Control de la calidad del aire y pérdidas de carga***

Controlar la calidad del aire en cada máquina, mediante la instalación de unidades de mantenimiento en cada una de ellas. Con lo cual se logrará regular la presión de entrada y se evitará que ingrese condensado a los elementos neumáticos.

Sin embargo será necesario dar seguimiento al estado de estos elementos, pues un filtro sucio puede producir una caída de presión de 1.5 [Bar].

### ***1.3.5.4. Unidad de mantenimiento***

Antes de que el aire ingrese a la máquina, se debe montar un equipo compacto que prepare finamente el fluido, filtrándolo nuevamente, eliminando la humedad restante y lubricándolo deliberadamente con aceite especial para este fin. (Serrano, 2011)

De acuerdo con Creus (2007), la unidad de mantenimiento está compuesta por un filtro, un regulador de presión y un lubricador de aire. Esta combinación, filtro-regulador-lubricador, se denomina unidad de mantenimiento y está dotado de un drenaje manual. Además este conjunto no debe estar alejado a más de 5 metros del dispositivo neumático, o máquina, para evitar la precipitación de partículas de aceite en la tubería. En la figura 17 se muestra una unidad de mantenimiento con sus partes.

Filtro regulador con manómetro y lubricador

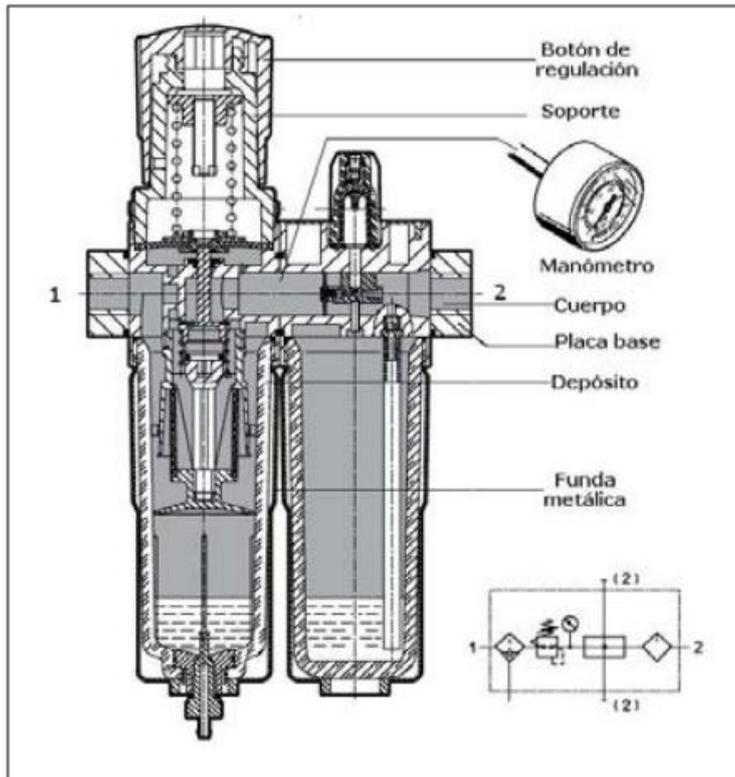


Figura 17. Filtro regulador con manómetro y lubricador  
Fuente: Creus (2007, pág. 142)

## Capítulo 2:

### Redimensionamiento de la red de aire comprimido de la planta de producción de imprenta Don Bosco

#### 2.1. Recopilación de datos de la actual red de aire comprimido

Para identificar las condiciones en las que se encuentra la actual red de aire se procedió con la adquisición de los siguientes datos:

- ❖ Presión de trabajo en la red.
- ❖ Consumo eléctrico de los compresores.
- ❖ Consumo de aire comprimido total de la nave industrial.
- ❖ Calidad del aire.
- ❖ Identificación de defectos de diseño.

Cabe mencionar que la información se empezó a recopilar desde el 05 de Octubre del 2015 y la misma fue documentada. Además se realizó el levantamiento de un plano de la nave industrial, en el cual se puede observar la ubicación de todas las máquinas de la Imprenta y la proyección de las nuevas máquinas.

##### 2.1.1. Presiones de trabajo de la actual red

Actualmente la red de aire comprimido es presurizada por un compresor Kaeser AS 25, que genera hasta una presión de 125 [Psi (g)].

Tabla 5.  
Presión y caudal que entrega el compresor actual

CAUDAL [cfm]



| Máxima presión de trabajo [psig] | AS 20 | AS 25 | AS 30 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| 125                              | 92    | 111   | 124   |
| 160                              | 77    | 94    | 104   |
| 217                              | 58    | 72    | 83    |

Nota: Con esta tabla se puede determinar el caudal en pies cúbicos por minuto que entrega el compresor Kaeser AS 25 en condiciones normales, conociendo la presión máxima de trabajo que es 125 [psig].  
Fuente: Kaeser compresores S.L. (pág. 13)

El compresor genera 111 [cfm] a 125 [Psi] bajo condiciones standard, sin embargo su capacidad de entrega del caudal volumétrico es afectado por la altitud geográfica en la que está trabajando, que es de 0,717 [Bar].

Por este motivo (y como se había explicado en el capítulo anterior) el caudal real que entrega el compresor es igual a:

$$Q_R = 0,717 \times Q_N$$

Donde:  $Q_R = \text{Caudal volumétrico del compresor trabajando en Quito}$

$Q_N = \text{Caudal volumétrico del compresor bajo condiciones normales}$

$$Q_R = 0,717 \times (111 \text{ [cfm]})$$

$$Q_R = 79,59 \text{ [cfm]} = 37,56 \left[ \frac{l}{s} \right]$$

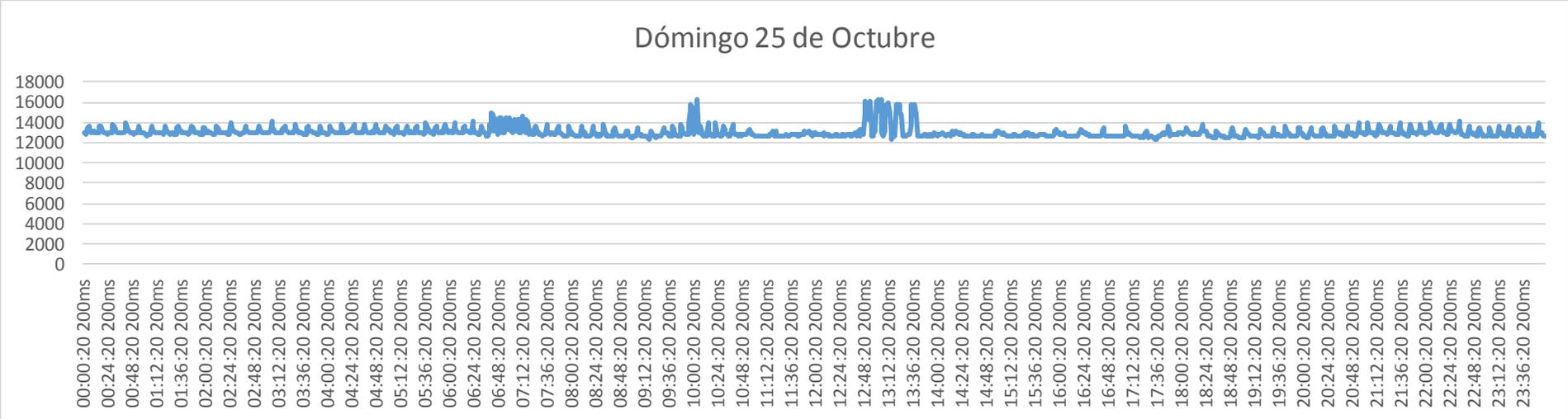
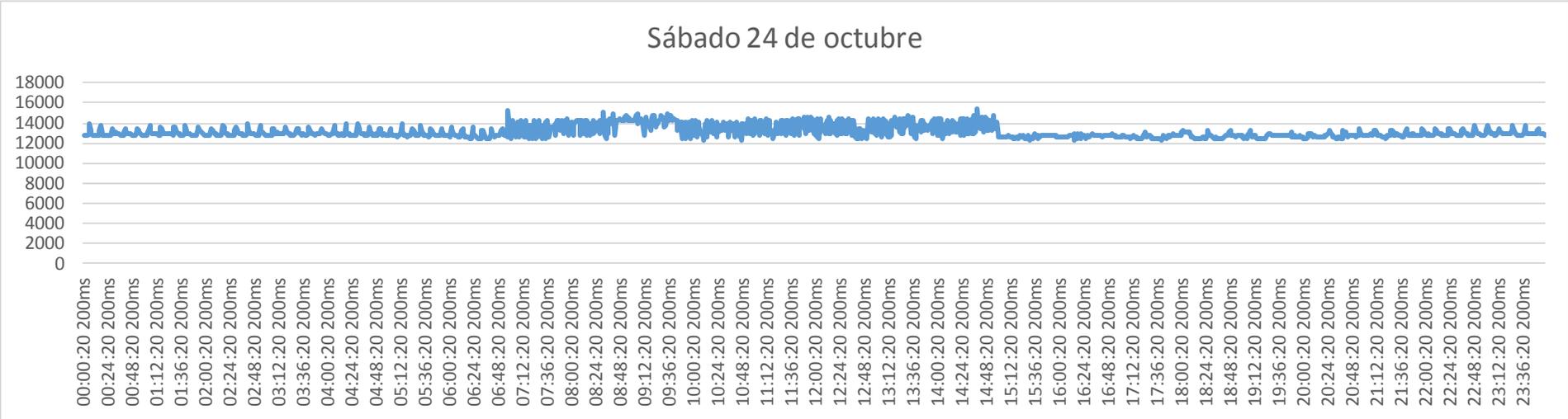
### 2.1.2. Consumo eléctrico del compresor

Todo compresor presenta una característica particular de consumo eléctrico, pues el mismo es fluctuante, variando de un momento a otro, dependiendo en gran medida de la demanda de consumo de aire comprimido. Siendo el valor de consumo eléctrico mayor cuando el equipo se encuentra en carga, es decir, cuando está abasteciendo a la red de aire comprimido necesario para que las máquinas puedan trabajar.

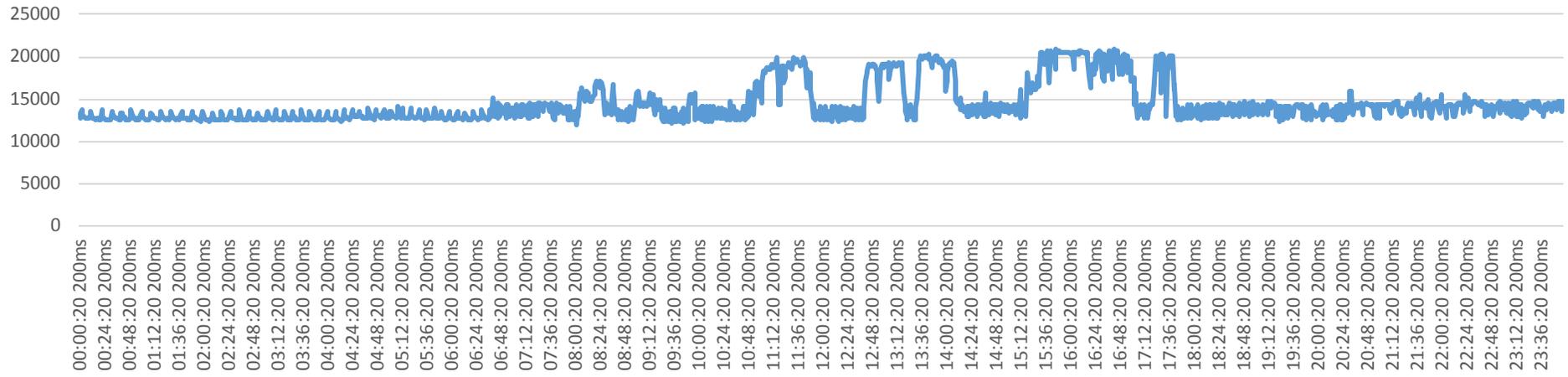
Para el estudio del consumo eléctrico se instaló en el compresor un analizador de corriente trifásica “FLUKE 435”, desde el día jueves 22 de octubre hasta el día viernes 6 de noviembre del 2015. Y con la ayuda del programa Excel se graficaron los datos adquiridos por el analizador.

Se analizó un periodo de tiempo de 7 días y 12 horas, para efectos de proyección al consumo de un mes. Es decir desde el día sábado 24 de octubre desde las 00h00 hasta el día 31 de octubre 12h00 (medio día), periodo en el cual la producción en empresa fue lo más constante posible. Dando un total de 7,5 días que multiplicado por 4 semanas se proyecta a un mes de 30 días. A continuación se presentarán las gráficas obtenidas con el analizador.

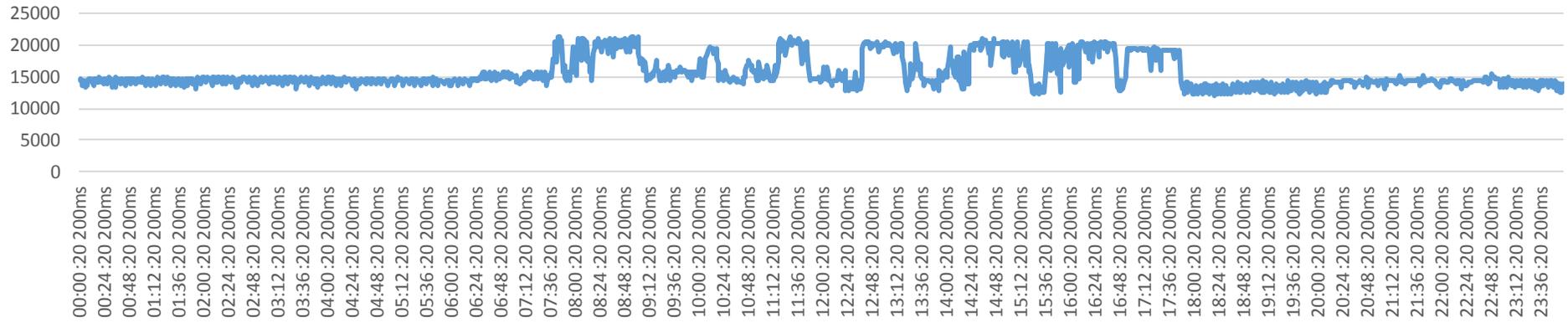
2.1.2.1. Gráficas de consumo energético de los días estudiado



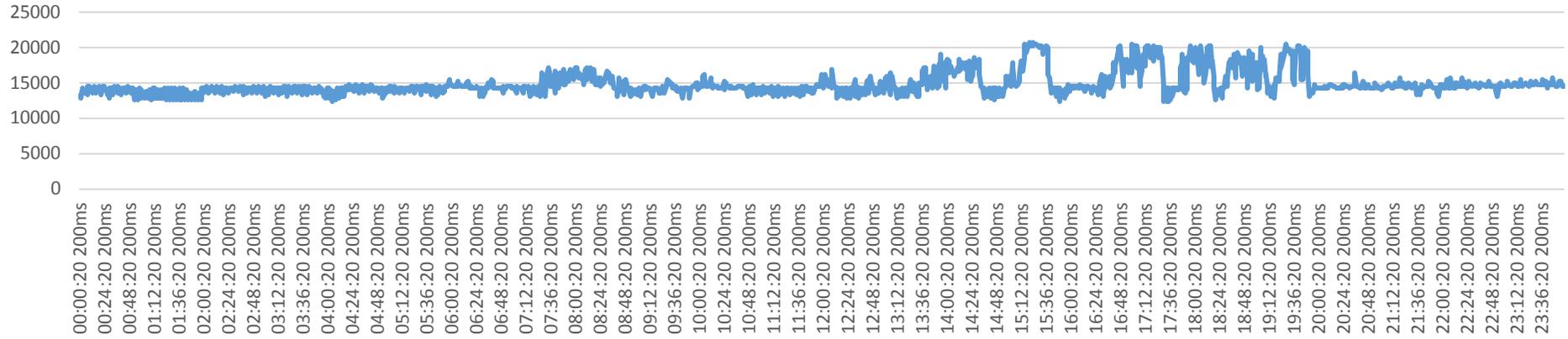
### Lunes 26 de Octubre



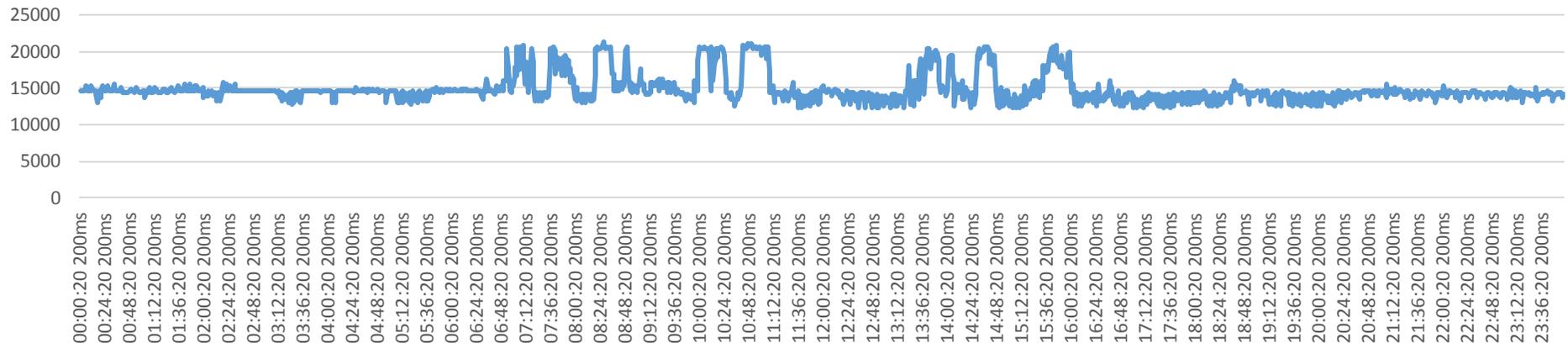
### Martes 27 de Octubre



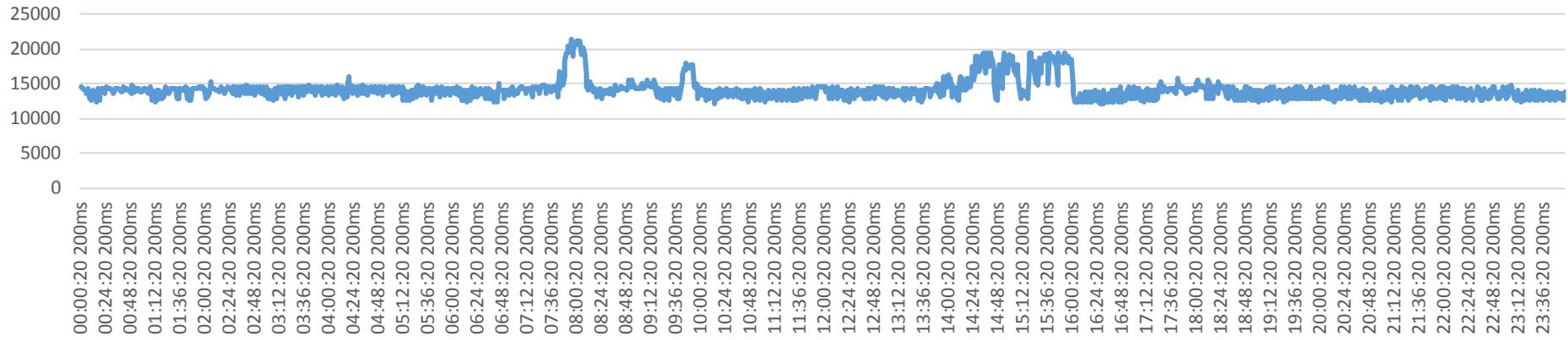
### Miércoles 28 de Octubre



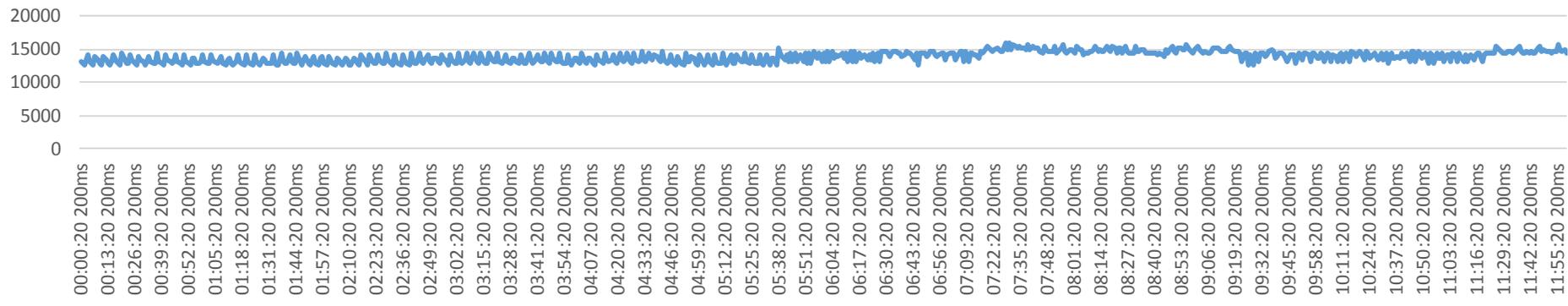
### Jueves 29 de Octubre



### Viernes 30 de Octubre



### Sábado 31 de Octubre



En la tabla 6 se detalla la información más relevante que se obtuvo de las gráficas anteriormente expuestas.

Tabla 6.  
Picos de consumo de la potencia aparente media de los días estudiados

| Día       | Fecha      | Hora desde | Hora hasta | Potencia Aparente Total Media [Wattios] |               |
|-----------|------------|------------|------------|---|---------------|
|           |            |            |            | Pico más bajo                           | Pico más alto |
| Sábado    | 24/10/2015 | 0:00       | 6:30       | 12500                                   | 13900         |
| Sábado    | 24/10/2015 | 6:31       | 15:00      | 12500                                   | 15400         |
| Sábado    | 24/10/2015 | 15:01      | 23:59      | 12300                                   | 13700         |
| Domingo   | 25/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12400                                   | 16200         |
| Lunes     | 26/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12200                                   | 20900         |
| Martes    | 27/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12100                                   | 21300         |
| Miércoles | 28/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12400                                   | 20800         |
| Jueves    | 29/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12400                                   | 20900         |
| Viernes   | 30/10/2015 | 0:00       | 23:59      | 12100                                   | 21100         |
| Sábado    | 31/10/2015 | 0:00       | 12:00      | 12600                                   | 16000         |

Nota: En la tabla se muestra el consumo eléctrico de cada uno de los días estudiados detallando la fecha y el valor en wattios de los picos: bajo y alto. Valores que se almacenaron y se obtuvieron del analizador trifásico "Fluke 435"

Elaborado por: E. Jacho (2016)

A partir de los gráficos de consumo eléctrico y de la tabla 6 se puede explicar lo siguiente:

Del día 24 de octubre del 2015 se observa lo siguiente:

- Existe un aumento de potencia desde las 6h30 horas hasta las 15h00 horas, tomando en cuenta que es un día sábado, se puede concluir que tal aumento se debe a la jornada de trabajo.
- En el periodo de tiempo previo a las 6h30 y posterior a las 15h00 se observa un comportamiento fluctuante de la potencia aparente del compresor, lo que significa que el compresor (a pesar que la planta de producción no trabaje), se enciende para presurizar la red de aire. Se puede concluir que la red actual de aire comprimido presenta fugas y estas ocasionan que el equipo trabaje aun cuando no sea de beneficio para los procesos de producción.

Del día 25 de octubre del 2015 se observa lo siguiente:

- La conclusión más relevante en esta gráfica es que a pesar de ser un día domingo el comportamiento de la potencia requerida por el compresor nuevamente se muestra fluctuante y como se había explicado anteriormente esto se produce por la presenta fugas en la red ocasionando un consumo de energía innecesario por parte del compresor.

En las gráficas siguientes, de los días 26, 27, 28, 29, 30 y 31 de octubre del 2015, se observa el mismo comportamiento que el de la primera gráfica, en resumen:

- Existe un aumento de potencia en un periodo de tiempo el cual se lo justifica por ser el horario de la jornada de trabajo.
- También se observa los periodos de tiempo previo a la jornada laboral y posterior a la misma, en las que el compresor requiere de potencia para presurizar la red mostrándose en la gráfica como un comportamiento fluctuante de la potencia aparente del compresor, lo que se concluye como la presenta fugas en la red y que ocasionando un consumo de energía innecesario por parte del compresor.

También en general se observa que en ningún momento el compresor se detiene, pues constantemente se encuentra consumiendo corriente.

#### ***2.1.2.2. Cálculo del consumo eléctrico***

Para el cálculo del consumo eléctrico del compresor se obtuvo la potencia eléctrica del mismo, que es la cantidad de energía entregada o absorbida por este elemento en un tiempo determinado. La energía consumida se mide en vatios-hora (Wh), o en kilovatios-hora (kWh). El analizador adquirió y almacenó durante cada minuto, varios datos como: potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, entre muchos otros, de los cuales y es a partir de este último valor (potencia aparente) fue multiplicado por una unidad de tiempo para obtener la energía absorbida por el equipo.

Así pues, como el analizador adquirió información cada minuto (como se había mencionado anteriormente), y como el consumo del compresor varía de un momento a otro, se calcularon valores reales de consumo en kilovatios-hora [kWh].

Con estos valores en kWh, solo restaba multiplicar el valor resultante por el precio del kWh, que la empresa eléctrica cobra a la Comunidad Salesiana (información detallada en la tabla 7). Y son estos resultados lo que se mostrarán en la tabla 8.

Tabla 7.

Tarifa del costo del kilowatio-hora dependiendo del horario en que se consume la energía

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| Costo de energía eléctrica por kilowatio-hora [kWh] desde las 7:00 hasta las 22:00 | 8 centavos de dólar / kWh   |
| Costo de energía eléctrica por kilowatio-hora [kWh] desde las 22:00 hasta las 7:00 | 6,2 centavos de dólar / kWh |

Nota: En la tabla se muestra el valor del costo de energía eléctrica de acuerdo al periodo de tiempo de todo un día, valores que se obtuvieron de la planilla de luz que cancela Imprenta Don Bosco.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

Tabla 8.

Consumo de energía y costo por día durante 7 días y 12 horas

| Días                | kWh durante 1 día | Costo USD x día |
|---------------------|-------------------|-----------------|
| Sábado 24           | 314,9583          | 23,0980         |
| Domingo 25          | 311,8583          | 22,8312         |
| Lunes 26            | 347,3067          | 25,6511         |
| Marte 27            | 372,6633          | 27,4874         |
| Miércoles 28        | 358,1483          | 26,3544         |
| Jueves 29           | 356,5067          | 26,1809         |
| Viernes 30          | 340,7033          | 25,0044         |
| Sábado 31 medio día | 166,0850          | 11,5950         |
| Total x semana      | 2568,2300         | 188,2025        |
| Proyección x mes    | 10272,9200        | 752,8100        |

Nota: En la tabla se detallan los resultados de cálculo del consumo en kilowatios-hora de los días estudiados y del valor en dólares que debe ser cancelado por día, realizándose una proyección del valor a pagar por todo un mes calendario, causado por el uso del compresor.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

En la tabla 8 se describe el consumo en kilowatios-hora desde el día sábado 24 de octubre del 2015 hasta el día sábado 31 de octubre del 2015, éste último se evaluó solo hasta las 12h00 (medio-día). Completando un total de 7,5 días analizados para el cálculo en desarrollo.

Se obtuvo un consumo eléctrico proyectado por mes de 10273 kWh que equivale a un valor monetario mensual de 753 dólares.

### **2.1.2.3. Acciones correctivas para disminuir el consumo eléctrico del compresor**

Para establecer acciones correctivas de ahorro energético se analizó a detalle el consumo energético de un día de trabajo del compresor (tabla 8) desde las 00h00 hasta las 23h59 del mismo día. En este caso se tomó el día más estable de producción que fue el martes 27 de octubre del 2015.

Periodos de tiempo analizados: como se había mencionado, la tarifa del costo del kilovatio-hora varía dependiendo del horario en que se consume la energía.

Si se toma en cuenta que el periodo de trabajo de Imprenta Don Bosco es desde las 6h30 hasta las 18h00, en que se utilizan las máquinas que requieren de aire comprimido. Se puede descartar el periodo de tiempo desde las 18h01 hasta las 5h29 del siguiente día, considerado como tiempo de consumo energético desperdiciado, ya que el compresor puede permanecer apaga. Dándole al equipo un tiempo prudente de 1 hora desde las 5h30 hasta las 6h30, (antes que empiece producción), para que genere aire comprimido y presurice el anillo.

Tabla 9.

Desglose del consumo energético de un día de trabajo del compresor

| Periodo de tiempo | kWh      | Costo x kWh | Valor a cancelar en USD |
|-------------------|----------|-------------|-------------------------|
| 0:00 - 5:29       | 79,0733  | 0,062       | 4,9025                  |
| 5:30 - 6:59       | 21,8900  | 0,062       | 1,3572                  |
| 7:00 - 17:59      | 188,9617 | 0,08        | 15,1169                 |
| 18:00 - 21:59     | 54,4967  | 0,08        | 4,3597                  |
| 22:00 - 23:59     | 28,2417  | 0,062       | 1,7510                  |

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| Costo por día                         | 27,4874 |
| Costo por tiempo de producción / día  | 16,4741 |
| Costo por tiempo sin producción / día | 11,0133 |

Nota: Con la ayuda del analizador se calculó el valor a cancelar en dólares de los diferentes periodos de tiempo en un mismo día, dependiendo de la jornada de trabajo y las respectivas tarifas acordadas a las horas, resultados que se muestran en esta tabla.

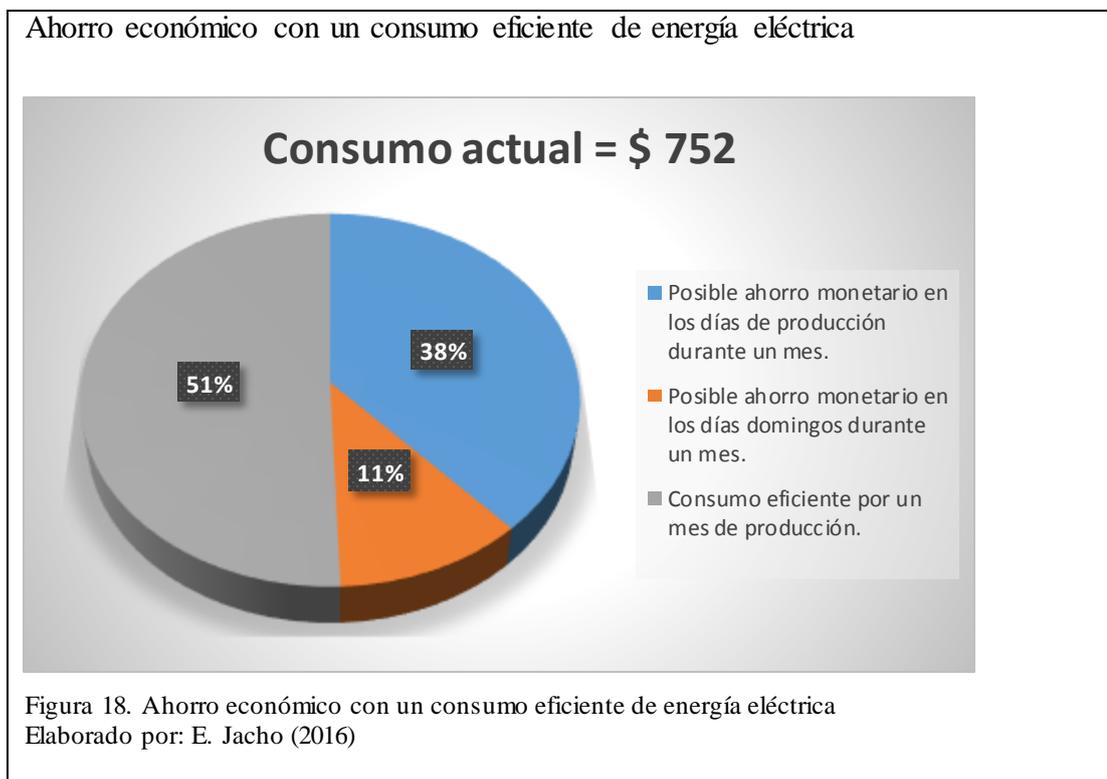
Elaborado por: E. Jacho (2016)

Con esta acción correctiva se puede ahorrar un total de 11 dólares por día.

Al aplicar esta acción durante los días de producción que son desde el lunes hasta el sábado, de cada semana se estaría ahorrando mensualmente 286 dólares. Además, se conoce que los domingos no son día de producción y que el costo por permanecer prendido el compresor este día en particular es de 22 dólares promedio.

Si se procede a mantener apagado todos los domingos, el generador de aire comprimido, habrá un ahorro mensual adicional de 88 dólares.

Así que mensualmente, del gasto actual que es 752 dólares con 81 centavos, se puede ahorrar un total de 374 dólares. Un porcentaje de ahorro del 49%, en relación al gasto actual por el consumo de energía eléctrica de la Imprenta Don Bosco, por causa de usar el compresor Kaeser para abastecer a la red de aire comprimido. Valores que se detallan en la figura 18, a continuación.



Para poder cumplir a satisfacción este ahorro, se recomienda la instalación de un control electrónico que apague y encienda el compresor de acuerdo al cronograma establecido de producción de las máquinas que requieren de aire comprimido.

Y cabe mencionar que de acuerdo al cronograma establecido por el departamento de producción, el ahorro energético y por ende gasto mensual, puede disminuir o aumentar.

### **2.1.3. Consumo de aire comprimido actual de la nave industrial**

El consumo actual de la red se lo calculó, mediante el mismo proceso para realizar el rediseño, expuesto en el capítulo anterior. Así pues se procedió con la adquisición de los siguientes datos y factores:

- Presión de trabajo.
- Pérdida de carga máxima.
- Consumo de aire de cada máquina o unidad.
- Factor de uso de cada máquina.
- Factor de simultaneidad.

### 2.1.3.1. Lista de máquinas que necesitan actualmente aire comprimido: su presión de trabajo y consumo

A continuación en la tabla 10 se resume la información requerida.

Tabla 10.

Lista de máquinas que necesitan aire comprimido

| EQUIPO                    | FUNCIÓN             | PRESIÓN DE TRABAJO |               | Caudal Normal | CAUDAL DE TRABAJO |             |              |
|---------------------------|---------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|
|                           |                     | Bar                | PSI           | SCFM          | CFM               | LPS         | M3/H         |
| <b>PRE-PRENSA</b>         |                     |                    |               |               |                   |             |              |
| Trendsetter 800 III       | Impresora Placas    | 6,89               | <b>100,00</b> | <b>13,00</b>  | <b>19,71</b>      | 9,30        | 33,49        |
| Suprasetter Heidelberg    | Impresora Placas    | <b>8,00</b>        | 116,03        | <b>13,00</b>  | <b>19,71</b>      | 9,30        | 33,49        |
| <b>PRENSA</b>             |                     |                    |               |               |                   |             |              |
| Serigráfica Simplex LCH   | Prensa Serigráfica  | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | <b>6,00</b>       | 2,83        | 10,19        |
| SX 102-8                  | Prensa 8 colores    | <b>8,00</b>        | 116,03        |               | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| CD 102-4 PRESET PLUS      | Impresora 4 Colores | <b>8,00</b>        | 116,03        |               | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| Ryobi 520 GX              | Impresora 4 Colores | <b>8,00</b>        | 116,03        |               | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| Indigo 7000 Digital Press | Impresora digital   | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | <b>4,00</b>       | 1,88        | 6,79         |
| <b>ENCUADERNACIÓN</b>     |                     |                    |               |               |                   |             |              |
| Plastimatic Evolution 80  | Laminador semi-auto | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | <b>8,00</b>       | 3,77        | 13,59        |
| Sistema PUR               | Pistola de goma     | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | <b>4,00</b>       | 1,88        | 6,79         |
| Sprinter Wohlenberg       | Alzadoras           | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | 17,65             | <b>8,33</b> | 30,00        |
| City 4000 Wohlenberg      | Encolar             | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | 5,88              | 2,77        | <b>10,00</b> |
| Trim-tec Wohlenberg       | trilateral          | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | 9,41              | 4,44        | <b>16,00</b> |
| Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>        | 87,02         |               | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |

Nota: En la tabla se enlistan todas las máquinas que actualmente (octubre, 2015) se encuentran en funcionamiento en la empresa y que requieren de aire comprimido para su uso, incluyendo equipos que tiene sus compresores propios y que no están conectados a la red.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 2.1.3.2. Cálculo del consumo actual de la red de aire comprimido

A continuación en la tabla 11 se detalla el factor de uso y el factor de simultaneidad de los equipos que actualmente se encuentran conectados a la red de aire comprimido y el valor del caudal total calculado con la ecuación 6, pero aun sin ser corregido, cabe recalcar que de la tabla anterior no todos se encuentran conectados a la red actual:

Tabla 11.

Lista de máquinas que están conectadas al anillo actual de aire comprimido, su factor de uso y simultaneidad

| EQUIPO                    | CANTIDAD | CAUDAL DE TRABAJO |             |              | FACTOR DE USO<br>% | F. DE SIMULTANEIDAD                        | CONSUMO PARCIAL<br>(l/s) |
|---------------------------|----------|-------------------|-------------|--------------|--------------------|--|--------------------------|
|                           |          | CFM               | LPS         | M3/H         |                    |  |                          |
| <b>PRE-PRENSA</b>         |          |                   |             |              |                    |  |                          |
| Suprasetter Heidelberg    | 1,00     | <b>19,71</b>      | <b>9,30</b> | 33,49        | 40%                | 1,00                                       | 3,7213                   |
| <b>PRENSA</b>             |          |                   |             |              |                    |  |                          |
| Serigráfica Simplex LCH   | 1,00     | <b>6,00</b>       | <b>2,83</b> | 10,19        | 25%                | 1,00                                       | 0,7079                   |
| CD 102-4 PRESET PLUS      | 1,00     | <b>9,10</b>       | <b>4,29</b> | 15,46        | 40%                | 1,00                                       | 1,7179                   |
| Indigo 7000 Digital Press | 1,00     | <b>4,00</b>       | <b>1,88</b> | 6,79         | 40%                | 1,00                                       | 0,7551                   |
| <b>ENCUADERNACIÓN</b>     |          |                   |             |              |                    |  |                          |
| Sistema PUR               | 1,00     | <b>4,00</b>       | <b>1,88</b> | 6,79         | 25%                | 1,00                                       | 0,4719                   |
| Sprinter Wohlenberg       | 1,00     | 17,65             | <b>8,33</b> | 29,99        | 60%                | 1,00                                       | 5,0000                   |
| City 4000 Wohlenberg      | 1,00     | 5,88              | <b>2,77</b> | <b>10,00</b> | 50%                | 1,00                                       | 1,3889                   |
| Trim-tec Wohlenberg       | 1,00     | 9,41              | <b>4,44</b> | <b>16,00</b> | 50%                | 1,00                                       | 2,2222                   |
| Toma para mantenimiento   | 1,00     | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        | 5%                 | 1,00                                       | 0,3000                   |
|                           |          |                   |             |              |                    | <b>Caudal total requerido no corregido</b> | <b>16,2853</b>           |

Nota: En la tabla se detallan los factores de uso y simultaneidad de las máquinas que se encuentran conectadas a la red actual de aire comprimido (octubre, 2015), información que se adquirió con la ayuda del jefe de mantenimiento de la empresa, (persona que tiene 10 años de experiencia en el funcionamiento de este tipo de máquinas)

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Corrección del caudal tomando en cuenta que tanto el porcentaje de fugas y el porcentaje de reservas se consideran como 0%, pues se requiere calcular el valor del consumo teórico de la red actual, el cual no contempla ni ampliaciones, ni fugas.

Cálculo realizado mediante la ecuación 7:

$$Q_{\text{corregido}} \left( \frac{l}{s} \right) = (Q_T + (Q_T \times \% \text{ Reserva})) + (Q_T \times \% \text{ Reserva} \times \% \text{ Fugas}) \times 2$$

Tabla 12.

Resultados del caudal corregido en diferentes unidades de flujo volumétrico

|                       | Caudal en diferentes unidades |                     |                       |                     |       |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------|
|                       | [l/s]                         | [m <sup>3</sup> /s] | [m <sup>3</sup> /min] | [m <sup>3</sup> /h] | [Cfm] |
| Consumo corregido (Q) | 32,57                         | 0,03257             | 1,954                 | 117,25              | 69,01 |

Nota: En la tabla se puede observar el resultado del cálculo del consumo de aire comprimido de la red actual de la nave industrial, en diferentes unidades de caudal volumétrico.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

#### 2.1.4. Calidad de aire actual

Para determinar la calidad de aire actual se procedió con una inspección visual de la red de distribución. Revelando las siguientes singularidades:

- ❖ El anillo no presenta filtros en línea.
- ❖ Algunas máquinas disponen de unidades de mantenimiento antes de conectarse con la red de distribución de aire comprimido.

Por tal motivo se puede concluir que la calidad del aire la dará el secador y que solo en las máquinas en las que se encuentren instaladas las unidades de mantenimiento se podrá obtener la calidad de aire requerida.

Para conocer que calidad de aire se está obteniendo después de que el fluido pasa por el secador, se utilizará el esquema de la figura 5, que muestra el recorrido que hace el aire comprimido desde el compresor, pasando por el secador y al no tener un filtro en línea, ni otro elemento que mejore la calidad del fluido, la clase de pureza del aire comprimido que corresponde a la ISO 8573 – 1 es:

|        |         |
|--------|---------|
| Polvo  | clase 4 |
| Agua   | clase 4 |
| Aceite | clase 3 |

#### ISO 8573 – 1; 4.4.3

Identificación de la calidad del aire de la red actual mediante el esquema de tratamiento de aire con secador refrigerativo

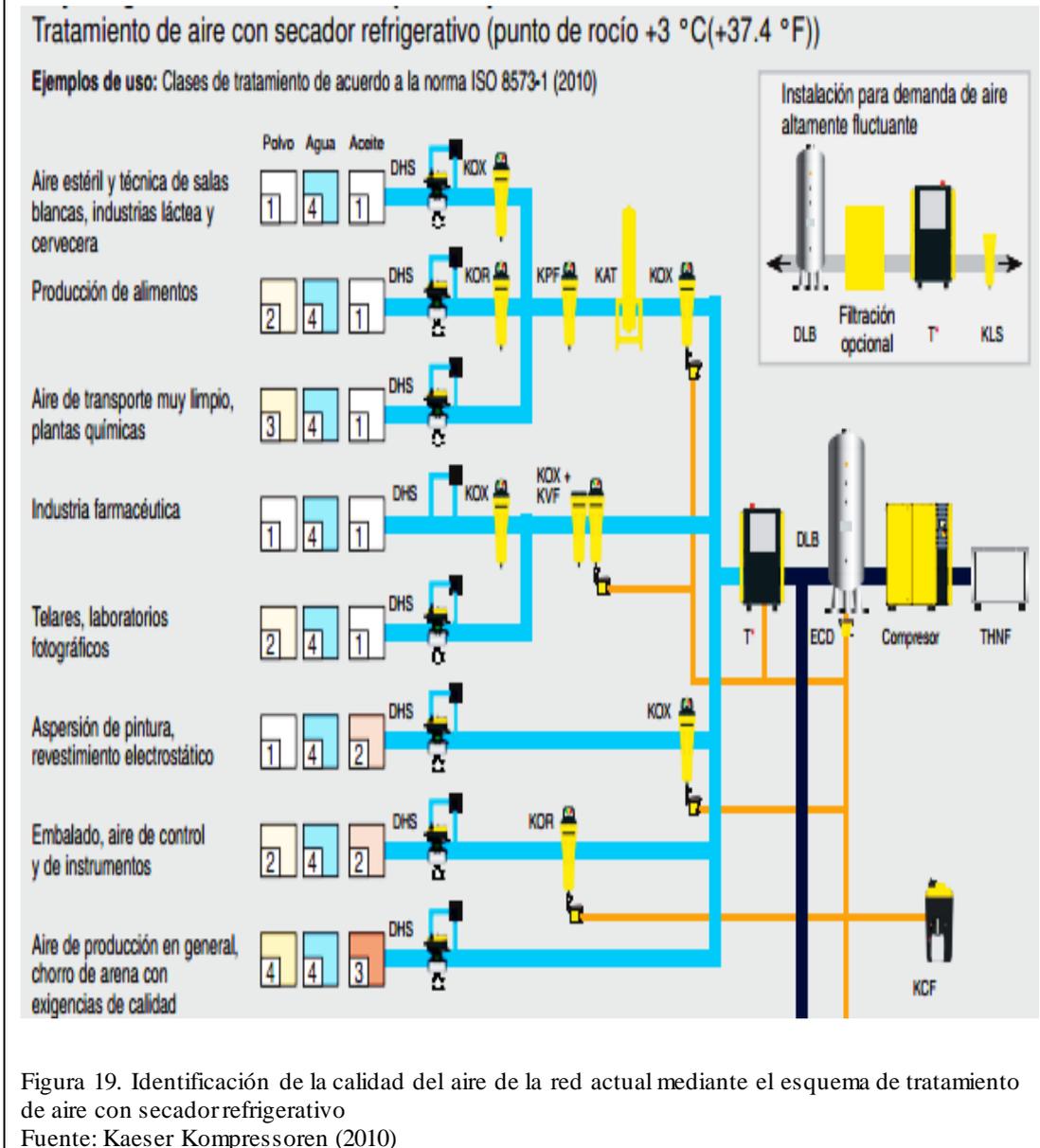


Figura 19. Identificación de la calidad del aire de la red actual mediante el esquema de tratamiento de aire con secador refrigerativo  
 Fuente: Kaeser Kompressoren (2010)

En la figura 19 se puede observar que cuando el aire comprimido parte del compresor solo pasa por un secador y el tanque de almacenamiento, pero no pasa por un filtro, por esa razón, se obtiene la calidad de aire anteriormente mencionando. Calidad que no es la adecuada para las máquinas de la industria gráfica. Y que esto puede ser el factor que a mediano y largo plazo destruya elementos neumáticos (como cilindros neumáticos, electroválvulas, entre otros) o afecte su buen funcionamiento, reduciendo su tiempo de vida útil.

### 2.1.5. Análisis de la configuración actual de la red de aire comprimido

Actualmente el sistema de generación de aire comprimido está configurado de la siguiente manera:

❖ Compresor: AS 25, marca Kaeser, figura 20.

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Presión de trabajo                       | 125 [PSI]                            |
| Caudal entregado en condiciones estándar | 111 [cfm]                            |
| Caudal real entregado                    | 79,6 [cfm] o 37,56 [ $\frac{l}{s}$ ] |

Compresor actual



Figura 20. Compresor actual  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

El cálculo del caudal requerido actualmente fue de 60 [cfm], sin contar con el valor extra que generan las fugas. Si el compresor entrega 79,6 [cfm], se puede concluir que la red no tiene problemas con el abastecimiento de aire comprimido para la nave industrial.

Sin embargo hay que tomar en cuenta que actualmente de las doce máquinas que necesitan del fluido en mención, descritas en la tabla 10, cuatro no están conectadas a la red:

- Trendsetter 800 III
- Prensa, SX 102-8
- Prensa, Ryobi 520 GX
- Plastimatic Evolution 80

Y que al ser conectadas ocasionarán un aumento del consumo del flujo volumétrico de aire presurizado.

❖ Secador: TCH 32, marca Kaeser, figura 21.

Cabe mencionar que la información adquirida del secador y la que se necesitará para el cálculo pertinente se obtuvo del anexo 2.

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| Presión de trabajo         | 125 [PSI] |
| Capacidad máxima de secado | 110 [cfm] |

Secador actual



Figura 21. Secador actual  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

A continuación se procede con la comprobación del buen dimensionamiento del secador que se tiene actualmente en la red de aire, mediante la utilización de los factores de corrección adquiridos del anexo 2.

#### Factores de corrección

Los secadores refrigerativos de Kaeser están dimensionados en condiciones estándar a 30°C de temperatura ambiente con una presión de aire de entrada de 100 [Psi (g)] y 38°C de temperatura. Si se desea seleccionar un secador de acuerdo a las necesidades diferentes mencionadas anteriormente, se debe corregir las condiciones actuales del sistema a las condiciones estándar. Para ello se multiplica el flujo de aire requerido por cada uno de factores de corrección y se obtendrá la capacidad mínima requerida del secador.

Caudal entregado por el compresor en condiciones reales: 79,6 [cfm]

Presión de trabajo 125 [Psi (g)] y Temperatura de admisión del aire comprimido:

$$35\text{ °C} \Rightarrow k_{Te} = 1,11$$

Temperatura ambiente:  $25\text{ °C} \Rightarrow k_{Ta} = 1,14$

Desarrollo de la fórmula

$$V_{max.servicio} = V_{referencia} \times k_{Te} \times k_{Ta}$$

$$V_{max.servicio} = (79,6 \times 1,11 \times 1,14)[cfm]$$

$$V_{max.servicio} = 100,72 [cfm]$$

Por lo tanto el secador refrigerativo Kaeser, está bien dimensionado.

❖ Tanque: 300 galones, marca Kaeser, figura 22.

Tanque actual



Figura 22. Tanque actual  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

A continuación se procede con el cálculo del tanque que necesita la red actual y para ello necesitamos los siguientes datos del compresor:

Presión de trabajo 125 [Psi]

Caudal entregado en condiciones estándar 111 [Cfm]

Caudal real entregado 79,6 [Cfm] o  $0,03756 [m^3]$

Se utilizará la fórmula presentada en el capítulo anterior:

$$V = \frac{0.25 \times Q_c \times P_1 \times T_0}{f_{max} \times \Delta P \times T_1}$$

Fórmula que toma en cuenta que el periodo total de carga y descarga para el diseño es de 60 segundos.

Tabla 13.

Datos para el cálculo del tanque

|               |                   |                |               |
|---------------|-------------------|----------------|---------------|
|               | P. descarga [PSI] | P. carga [PSI] |               |
|               | 120               | 110            |               |
| Caudal [m3/s] | P. descarga [bar] | P. carga [bar] | delta P [bar] |
| 0,0376        | 8,27              | 7,58           | 0,6895        |

|                         |                   |                 |
|-------------------------|-------------------|-----------------|
|                         | T. recibidor [°C] | T. entrada [°C] |
|                         | 30                | 20              |
| P. entrada [bar (abs.)] | T. recibidor [°K] | T. entrada [°K] |
| 0,7170                  | 303               | 293             |

Nota: La tabla está conformada por los datos que se requieren para el cálculo del tanque y con las unidades solicitadas.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

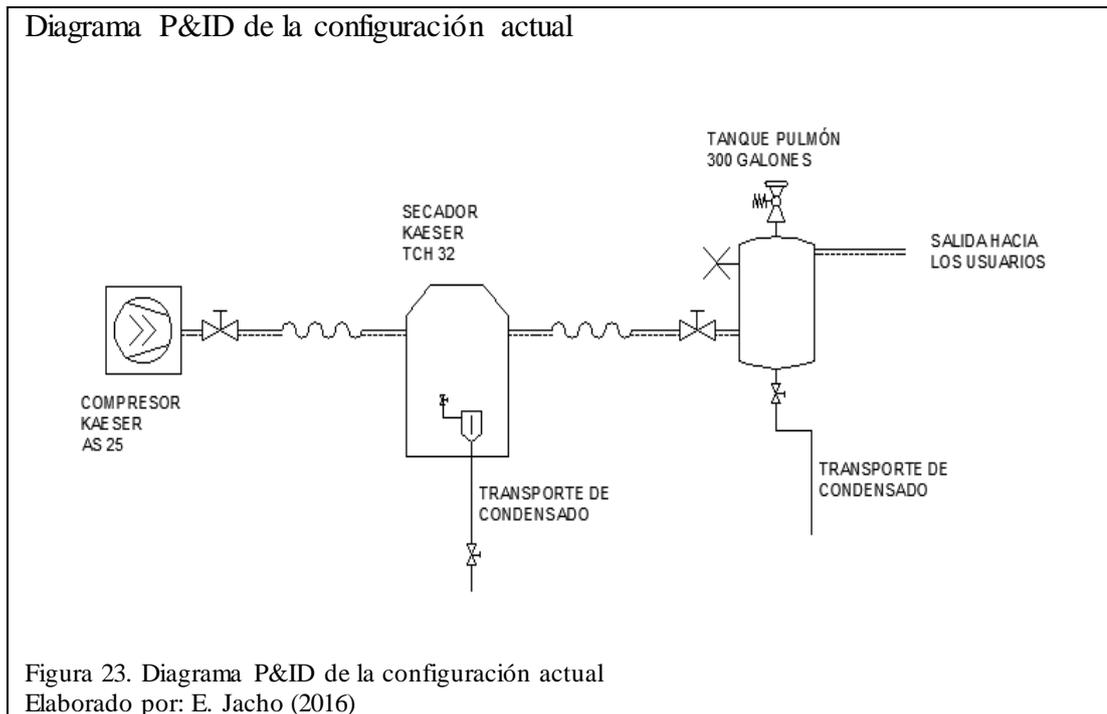
Desarrollo de la ecuación 5:

$$V = \frac{0.25 \times 0,0376 \times 0,717 \times 303}{f_{max} \times 0,6895 \times 293}$$

$$V = 0,606 \text{ m}^3 = 160 \text{ galones}$$

Actualmente se dispone de un tanque de 300 galones lo que en teoría está sobredimensionado para la actual red, sin embargo el disponer de un tanque más grande de lo calculado (se requiere de un tanque de 160 galones) beneficia para que el compresor descansa mayor tiempo, prolongando su ciclo de trabajo (periodo).

### 2.1.5.1. Diagrama P&ID actual



En la figura 23 se detalla el diagrama P&ID que actualmente el sistema de producción del aire comprimido lo conforman: el compresor, el secador y el tanque, conectados entre sí por mangueras para alta presión, sin embargo debe ser corregido la medida nominal de las mangueras ya que el diámetro de la tubería a la salida del compresor es de 1,25 pulgadas, mientras que el de la manguera es de diámetro 0,75 pulgadas, ocasionando caída de presión y que el tanque se demore más tiempo en llenarse.

Además el sistema necesita de un filtro en línea. Para conocer la capacidad del filtro se deberá realizar la corrección por las condiciones operativas en las que se encontrara la red. Partiendo de los datos del compresor actual.

Para calcular el flujo máximo para un filtro cuando valor no sea de 100 [Psi (g)] (como es el caso), se debe multiplicar el caudal nominal por el factor de corrección correspondiente a la presión mínima en la admisión del filtro. Información adquirida del Anexo 3.

Datos del compresor:

$$Q_{\text{compresor}} = 79,6 \text{ [cfm]}$$

$$P_{\text{compresor}} = 125 \text{ [psi (g)]}$$

Presión de trabajo: 125 [psi (g)] =>  $k_p = 1,22$

Desarrollo de la fórmula

$$V_{max.Operativo} = V_{referencia} \times k_p$$

$$V_{max.Operativo} = (79,6 \times 1,22)[cfm]$$

$$V_{max.servicio} = 97,11 [cfm]$$

Por lo tanto el filtro Kaeser, que necesita la red actual es:

KOR 100

### **2.1.6. Identificación de defectos de diseño en la red actual de aire comprimido**

Mediante la inspección visual se pudo observar los siguientes defectos:

- ❖ La tubería que conforma el anillo es una construcción mixta: PVC y galvanizado.
- ❖ La red no fue construida con una pendiente determinada.
- ❖ El anillo no dispone de puntos de purga a lo largo de su instalación.
- ❖ La red de aire comprimido no cuenta con apoyos para el tendido de tubería a distancias cortas, por tal motivo, el mismo presenta deformación por efecto de la gravedad.

### **2.2. Desarrollo de cálculos para el rediseño**

Es necesario recalcar que actualmente se encuentran conectadas al anillo de la red de aire nueve (9) máquinas, sin embargo para el rediseño se incluirán 4 máquinas que utilizan el aire comprimido de otros compresores, además Imprenta Don Bosco ha realizado la adquisición de 3 máquinas más, para ampliar el área digital, de las cuales todas necesitan aire comprimido, su consumo volumétrico es considerable, y serán incluidos en el rediseño. Por último y por petición del jefe de mantenimiento se instalarán 10 tomas de aire en lugares estratégicos para efectos de limpieza y procesos de mantenimiento.

Con estos antecedentes se procederá con el rediseño de la red de aire comprimido para 25 tomas (punto estratégicos de aire comprimido) distribuidos en la nave industrial.

### **2.2.1 Determinación de los parámetros requeridos para el desarrollo de los cálculos**

El desarrollo de los cálculos partirá con la búsqueda y adquisición de información en los diferentes manuales de las máquinas que requieren del fluido presurizado, complementando a la tabla anteriormente expuesta (tabla 10). Con la recopilación de los datos: presión de trabajo de cada equipo y su respectivo consumo de caudal, se elaboró la tabla 14 (lista de máquinas que necesitan aire comprimido) que más adelante se presentará.

En esta tabla también se unifican todas las unidades de caudal de los consumidores, pues algunos fabricantes detallan el consumo volumétrico de sus equipos bajo condiciones normales o standard y no como un flujo de aire libre suministrado (F.A.D.), en condiciones ambientales; que es al que deben ser unificados todos los consumos de las máquinas, con la ayuda de la ecuación 2 expuesta en el capítulo anterior.

Es preciso mencionar que solo para las máquinas: Trendsetter 800 III y la Suprasetter Heidelberg se detallan sus gastos volumétricos bajo condiciones normales, por tal motivo fue preciso transformar sus valores a unidades F.A.D.

### **2.2.2. Presión de trabajo**

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo anterior, de todas las máquinas que trabajan con aire comprimido se debe determinar cuál de éstas, necesita la presión más elevada, cuyo valor será la presión de trabajo en la red.

Por tal motivo, la presión de trabajo del sistema, de acuerdo a la tabla 14 será de 8 [bar (g)].

Tabla 14.

Lista de máquinas que necesitan aire comprimido

| ITEM | EQUIPO                    | FUNCIÓN             | P. DE TRABAJO |               | Q Normal     | CAUDAL DE TRABAJO |             |              |
|------|---------------------------|---------------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|-------------|--------------|
|      |                           |                     | Bar           | PSI           |              | SCFM              | CFM         | LPS          |
|      | <b>ENCUADERNACIÓN</b>     |                     |               |               |              |                   |             |              |
| 1    | Serigráfica Simplex LCH   | Prensa serigráfica  | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>6,00</b>       | 2,83        | 10,19        |
| 2    | Plastimatic Evolution 80  | Laminador semi-auto | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>8,00</b>       | 3,78        | 13,59        |
| 3    | Sistema PUR               | Pistola de goma     | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>4,00</b>       | 1,89        | 6,80         |
| 4    | Sprinter Wohlenberg       | Alzadoras           | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 17,66             | <b>8,33</b> | 30,00        |
| 5    | City 4000 Wohlenberg      | Encolar             | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 5,89              | 2,78        | <b>10,00</b> |
| 6    | Trim-tec Wohlenberg       | trilateral          | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 9,42              | 4,44        | <b>16,00</b> |
| 7    | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 8    | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 9    | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
|      | <b>DIGITAL</b>            |                     |               |               |              |                   |             |              |
| 10   | Indigo 7000 Digital Press | Impresora digital   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>4,00</b>       | 1,89        | 6,80         |
| 11   | Indigo 5000 Digital Press | Impresora digital   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>4,00</b>       | 1,89        | 6,80         |
| 12   | Indigo WS6600             | Impresora rotativa  | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | <b>25,00</b>      | 11,80       | 42,48        |
| 13   | Cartes GT                 | Troqueladora laser  | <b>8,00</b>   | 116,03        |              | <b>4,00</b>       | 1,89        | 6,80         |
| 14   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 15   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 16   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 17   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 18   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
|      | <b>PRENSA</b>             |                     |               |               |              |                   |             |              |
| 19   | SX 102-8                  | Prensa 8 colores    | <b>8,00</b>   | 116,03        |              | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| 20   | CD 102-4 PRESET PLUS      | Impresora 4 Colores | <b>8,00</b>   | 116,03        |              | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| 21   | Ryobi 520 GX              | Impresora 4 Colores | <b>8,00</b>   | 116,03        |              | <b>9,10</b>       | 4,29        | 15,46        |
| 22   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
| 23   | Toma para mantenimiento   | Pistola neumática   | <b>6,00</b>   | 87,02         |              | 12,71             | <b>6,00</b> | 21,60        |
|      | <b>PRE-PRENSA</b>         |                     |               |               |              |                   |             |              |
| 24   | Trendsetter 800 III       | Impresora Placas    | 6,89          | <b>100,00</b> | <b>13,00</b> | <b>19,44</b>      | 9,18        | 33,03        |
| 25   | Suprasetter Heidelberg    | Impresora Placas    | <b>8,00</b>   | 116,03        | <b>13,00</b> | <b>19,44</b>      | 9,18        | 33,03        |

Nota: En la tabla se enlistan los 25 puntos de abastecimiento de aire comprimido que se consideran en el rediseño. Los datos fueron obtenidos de los manuales de las diferentes máquinas.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Tabla 15.

Lista de máquinas, su factor de uso y simultaneidad

| EQUIPO                    | CANTIDAD | CAUDAL DE TRABAJO |             |         | FACTOR DE USO<br>% | FACTOR DE SIMULTANEIDAD       | CONSUMO PARCIAL<br>(l/s) |
|---------------------------|----------|-------------------|-------------|---------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|
|                           |          | CFM               | LPS         | M3/S    |                    |                               |                          |
| <b>ENCUADERNACIÓN</b>     |          |                   |             |         |                    |                               |                          |
| Serigráfica Simplex LCH   | 1,00     | <b>6,00</b>       | 2,83        | 0,00283 | 25%                | 1,00                          | 0,7079                   |
| Plastimatic Evolution 80  | 1,00     | <b>8,00</b>       | 3,78        | 0,00378 | 40%                | 1,00                          | 1,5102                   |
| Sistema Pur               | 1,00     | <b>4,00</b>       | 1,89        | 0,00189 | 25%                | 1,00                          | 0,4719                   |
| Sprinter Wohlenberg       | 1,00     | 17,66             | <b>8,33</b> | 0,00833 | 60%                | 1,00                          | 5,0000                   |
| City 4000 Wohlenberg      | 1,00     | 5,89              | 2,78        | 0,00278 | 50%                | 1,00                          | 1,3889                   |
| Trim-tec Wohlenberg       | 1,00     | 9,42              | 4,44        | 0,00444 | 50%                | 1,00                          | 2,2222                   |
| <b>DIGITAL</b>            |          |                   |             |         |                    |                               |                          |
| Indigo 7000 Digital Press | 1,00     | <b>4,00</b>       | 1,89        | 0,00189 | 40%                | 1,00                          | 0,7551                   |
| Indigo 5000 Digital Press | 1,00     | <b>4,00</b>       | 1,89        | 0,00189 | 40%                | 1,00                          | 0,7551                   |
| Indigo WS6600             | 1,00     | <b>25,00</b>      | 11,80       | 0,01180 | 40%                | 1,00                          | 4,7195                   |
| Cartes GT                 | 1,00     | <b>4,00</b>       | 1,89        | 0,00189 | 50%                | 1,00                          | 0,9439                   |
| <b>PRENSA</b>             |          |                   |             |         |                    |                               |                          |
| SX 102-8                  | 1,00     | <b>9,10</b>       | 4,29        | 0,00429 | 40%                | 1,00                          | 1,7179                   |
| CD 102-4 PRESET PLUS      | 1,00     | <b>9,10</b>       | 4,29        | 0,00429 | 40%                | 1,00                          | 1,7179                   |
| Ryobi 520 GX              | 1,00     | <b>9,10</b>       | 4,29        | 0,00429 | 40%                | 1,00                          | 1,7179                   |
| <b>PRE-PRENSA</b>         |          |                   |             |         |                    |                               |                          |
| Trendsetter 800 III       | 1,00     | <b>19,71</b>      | 9,30        | 0,00930 | 30%                | 1,00                          | 2,7910                   |
| Suprasetter Heidelberg    | 1,00     | <b>19,71</b>      | 9,30        | 0,00930 | 40%                | 1,00                          | 3,7213                   |
| Toma para mantenimiento   | 10,00    | 12,71             | <b>6,00</b> | 0,00600 | 5%                 | 0,68                          | 2,0294                   |
| Número de consumidores    | 25,00    |                   |             |         |                    | Caudal requerido no corregido | 32,1701                  |

Nota: En la tabla se detallan los factores de uso y simultaneidad de todas las máquinas que se incluyen para el rediseño, información que se adquirió con la ayuda del jefe de mantenimiento de la empresa, (persona que tiene 10 años de experiencia en el funcionamiento de este tipo de máquinas).

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 2.2.3. Cálculo del consumo total de aire presurizado de la nave industrial

En la tabla 15, se detalla el factor de uso y el factor de simultaneidad de los equipos de la lista anterior y el valor del caudal total, aun sin ser corregido. Tabla elaborada a partir de la ecuación 6, detallada en el capítulo anterior.

#### 2.2.3.1. Corrección del consumo total de aire de la nave industrial

Se realizó la corrección del caudal tomando en cuenta los valores, tanto: el porcentaje de fugas y el porcentaje de reservas, mediante la ecuación 7:

$$Q_{\text{corregido}} \left( \frac{l}{s} \right) = (Q_T + (Q_T \times \% \text{ Reserva}) + (Q_T \times \% \text{ Reserva} \times \% \text{ Fugas})) \times 2$$

Tabla 16.

Resultados del caudal corregido en diferente unidades

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| Total parcial Caudal (Q) [l/s] | 32,17010 |
| % de Reservas                  | 20,00000 |
| % de Fugas                     | 5,00000  |

|                       | Caudal en diferentes unidades |         |          |        |        |
|-----------------------|-------------------------------|---------|----------|--------|--------|
|                       | [l/s]                         | [m3/s]  | [m3/min] | [m3/h] | [Cfm]  |
| Consumo corregido (Q) | 77,85                         | 0,07785 | 4,671    | 280,26 | 164,95 |

Nota: En la tabla se puede observar el resultado del cálculo del consumo de aire comprimido para el rediseño de la red de la nave industrial, en diferentes unidades de caudal volumétrico.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

El valor del porcentaje de reserva o tolerancia por ampliación (20%), fue dado por el cliente (Imprenta Don Bosco). Y en cuanto al valor del porcentaje de fugas (5%), es el máximo valor que puede alcanzarse por las características de la tubería seleccionada, cuyo material escogido es la tubería de aluminio Legris Transair (la información técnica de esta tubería se encuentra en el anexo 4). A continuación en la figura 24 se muestra un esquema de la tubería en mención.

## Tubería legris transair

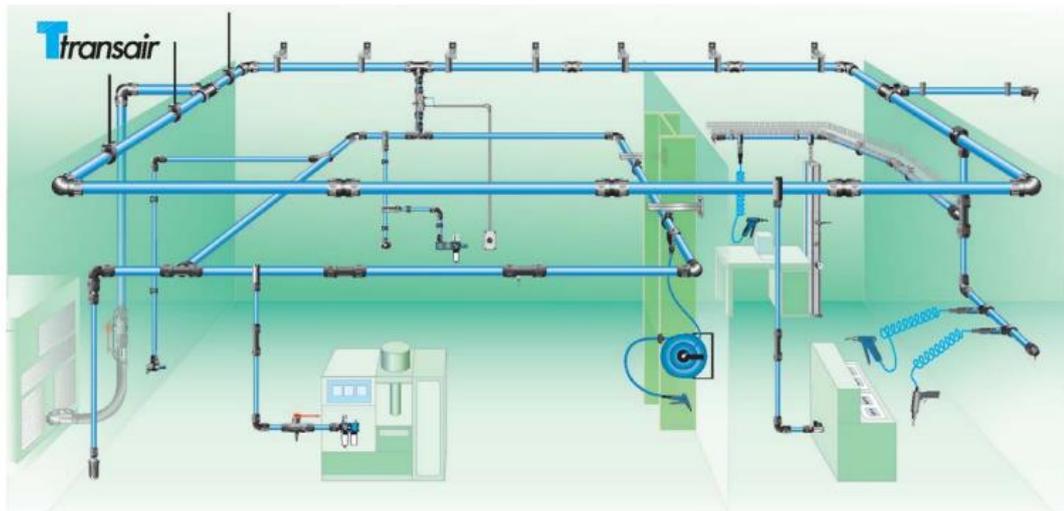


Figura 24. Tubería legris transair  
Fuente: Groupe Legris Industries (pág. 4)

### 2.2.4. Cálculo de las características del nuevo compresor

Imprenta Don Bosco C.S.P. posee un compresor Kaeser el cual entrega un caudal F.A.D. de 79,6 [Cfm] o 37,6 [l/s]. Sin embargo el caudal F.A.D. que se necesitará para el abastecimiento del rediseño es de 165 [Cfm] o 77,9 [l/s]. Razón por la cual se requiere de un segundo compresor de capacidad no menor a 85,4 [Cfm] o 40,3 [l/s]. Entonces, si:

$$Q_R = 0,717 \times Q_N$$

Donde:  $Q_R$  = Caudal volumétrico del compresor trabajando en Quito

$Q_N$  = Caudal volumétrico del compresor bajo condiciones normales

$$Q_N = \frac{Q_R}{0,717} = \frac{85,4}{0,717}$$

$$Q_N = 119,1 \text{ [cfm]} = 56,2 \text{ [l/s]}$$

Por tal motivo se decide seleccionar un compresor Kaeser de tornillo rotativo.

(Anexo 10):

|                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Modelo:                          | AS 25T                  |
| Potencia nominal del motor [Hp]: | 25                      |
| Presión [psi (g)]:               | 125                     |
| Capacidad:                       | 120 [cfm] = 56,64 [l/s] |

## 2.2.5. Selección de la calidad del aire para el sistema de distribución

De acuerdo con las características especificadas del aire comprimido que requieren los equipos (dato técnico de cada máquina que se informa en los respectivos manuales, anexo 5), la calidad del fluido corresponde a la ISO 8573 – 1:

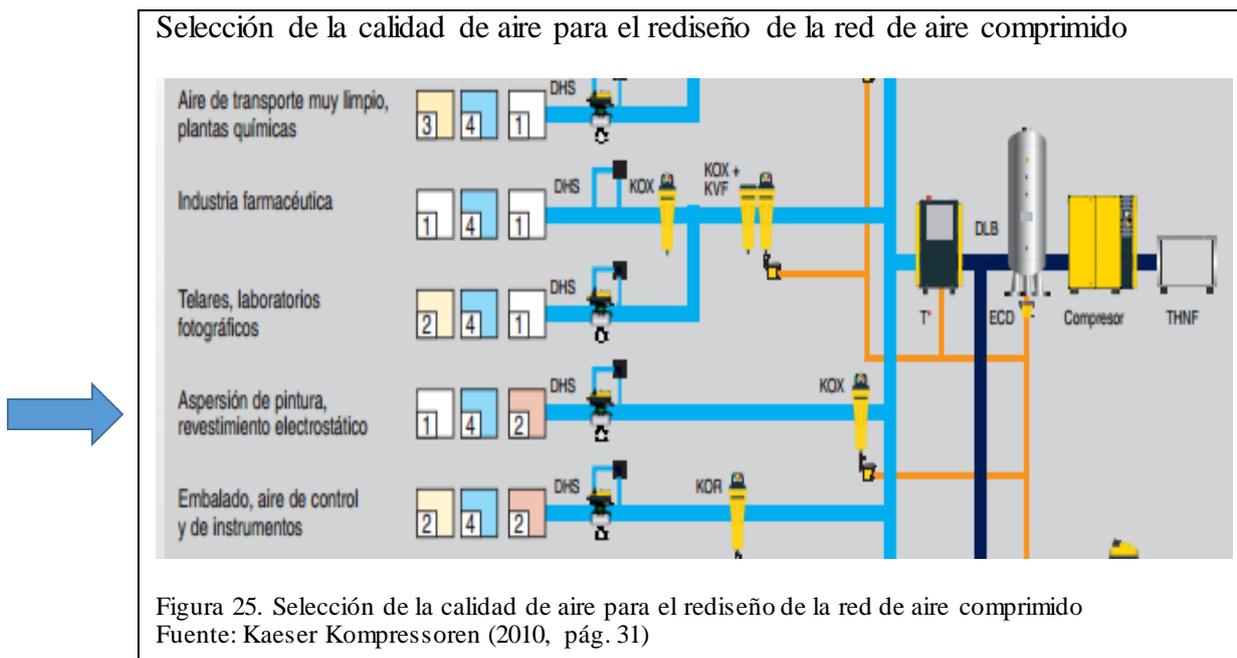
|        |         |
|--------|---------|
| Polvo  | clase 1 |
| Agua   | clase 4 |
| Aceite | clase 2 |

### ISO 8573 – 1; 1.4.2.

Que quiere decir una calidad de aire, de acuerdo a la tabla 2, que tenga:

- Un número máximo de partículas por metro cúbico de:
  - < o = a 20000 partículas de tamaño  $0,1 < o = d < o = 0,5$  (micras);
  - < o = a 400 partículas de tamaño  $0,5 < o = d < o = 1,0$  (micras);
  - < o = a 10 partículas de tamaño  $1,0 < o = d < o = 5,0$  (micras);
- Un punto de rocío de presión de:
  - < o = a  $+3^{\circ}\text{C}$  ( $+38^{\circ}\text{F}$ )
- Un remanente de aceite total [mg/m<sup>3</sup>]
  - < o = a 0,1 mg. por metro cúbico

Para conseguir tal calidad, se empleará el esquema de la figura 5 y se identificarán los elementos que se requiere.



En la figura 25 se puede observar que para que el aire cumpla con la calida de aire requerido debe pasar por :

- ❖ Separador ciclónico
- ❖ Secador refrigerativo
- ❖ Micro-filtro (filtro en línea)

#### 2.2.5.1. Secador refrigerativo

Para conocer la capacidad del secador se deberá realizar la corrección del caso por causa de las condiciones operativas en las que se encontrará. Partiendo del flujo volumétrico que entrega el compresor seleccionado en pies cúbicos por minuto [cfm].

Datos del compresor:

$$Q_{\text{compresor}} (\text{real}) = 120 \times 0,717 [\text{cfm}] = 86 [\text{cfm}]$$

$$P_{\text{compresor}} = 125 [\text{psi (g)}]$$

Elección de los factores de corrección del anexo 2:

P. de trabajo = 125 [psi (g)] y T. de admisión del aire comprimido:

$$35 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow k_{Te} = 1,11$$

Temperatura ambiente:  $25 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow k_{Ta} = 1,14$

Desarrollo de la fórmula

$$V_{\text{max.servicio}} = V_{\text{referencia}} \times k_{Te} \times k_{Ta}$$

$$V_{\text{max.servicio}} = (86 \times 1,11 \times 1,14) [\text{cfm}]$$

$$V_{\text{max.servicio}} = 108,8 [\text{cfm}]$$

Por lo tanto el secador refrigerativo Kaeser serie H, seleccionado del anexo 2 es:

Modelo TCH 32                      Caída de presión ocasionada por el elemento: 2,0 [psi]

#### 2.2.5.2. Micro-filtro

Para conocer la capacidad del filtro se deberá realizar la corrección por las condiciones operativas en las que se encontrará. Partiendo de los datos del compresor seleccionado.

Datos del compresor:

$$Q_{\text{compresor}} = 86 [\text{cfm}]$$

$$P_{\text{compresor}} = 125 [\text{psi (g)}]$$

Elección del factor de corrección en el anexo 3:

Presión de trabajo: 125 [psi (g)] =>  $k_p = 1,22$

Desarrollo de la fórmula

$$V_{max.Operativo} = V_{referencia} \times k_p$$

$$V_{max.Operativo} = (86 \times 1,22) [cfm]$$

$$V_{max.servicio} = 104,92 [cfm]$$

Por lo tanto el filtro Kaeser, seleccionado del anexo 3 es:

KOR 100 y cuya caída de presión ocasionada por el elemento: 3 [psi]

### 2.2.6. Dimensionamiento del tanque principal

Para el dimensionamiento se empleó la ecuación 5, que fue detalla en el capítulo anterior:

$$V = \frac{0.25 \times Q_c \times P_1 \times T_0}{f_{max} \times \Delta P \times T_1}$$

Y que toma en cuenta que el periodo total de carga y descarga para el diseño es de 60 segundos. Además, que se dimensionara de acuerdo con el compresor más grande.

Tabla 17.

Datos para el cálculo del tanque

|  |                   |                 |               |
|--|-------------------|-----------------|---------------|
| Caudal compresor condiciones normales [m3/s] | P. descarga [PSI] | P. carga [PSI]  |               |
| 0,0566                                       | 120               | 110             |               |
| Caudal compresor real entregado [m3/s]       | P. descarga [bar] | P. carga [bar]  | Delta P [bar] |
| 0,0406                                       | 8,2737            | 7,5842          | 0,6895        |
|  | T. recibidor [°C] | T. entrada [°C] |               |
|  | 30                | 20              |               |
| P. entrada [bar (abs.)]                      | T. recibidor [°K] | T. entrada [°K] |               |
| 0,7170                                       | 303               | 293             |               |

Nota: La tabla está conformada por los datos que se requieren para el cálculo del tanque y con las unidades solicitadas.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Desarrollo de la ecuación 5:

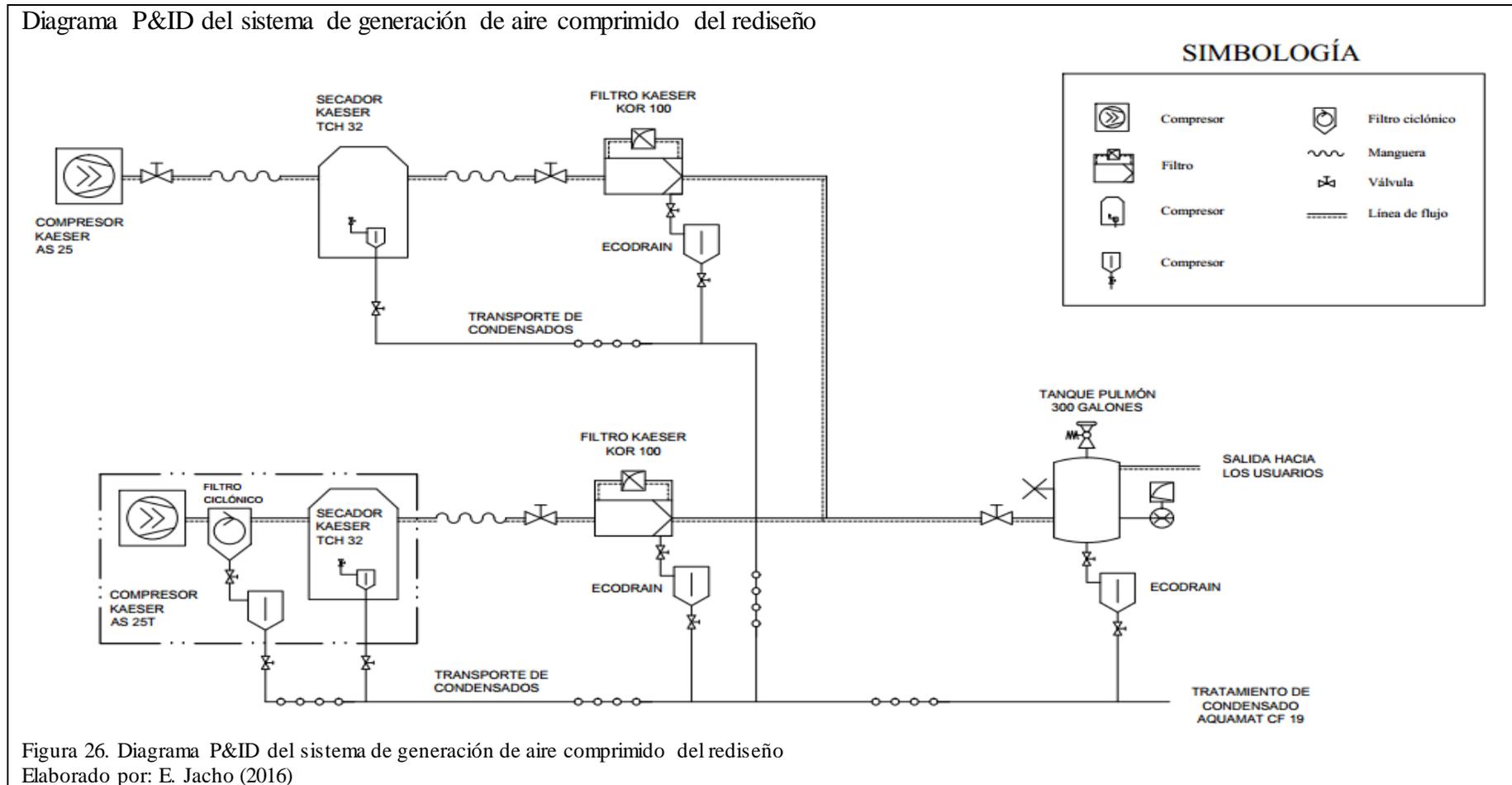
$$V = \frac{0,25 \times 0,0406 \times 0,717 \times 303}{f_{max} \times 0,6895 \times 293}$$

$$V = 0,6549 \text{ m}^3 = 173 \text{ galones}$$

Actualmente se dispone de un tanque de 300 galones, y como se había mencionado anteriormente, está sobredimensionado aún para el rediseño, sin embargo esto beneficiará para que el compresor descansa mayor tiempo, prolongando su ciclo de trabajo (periodo).

### 2.2.7. Diagrama P&ID del rediseño

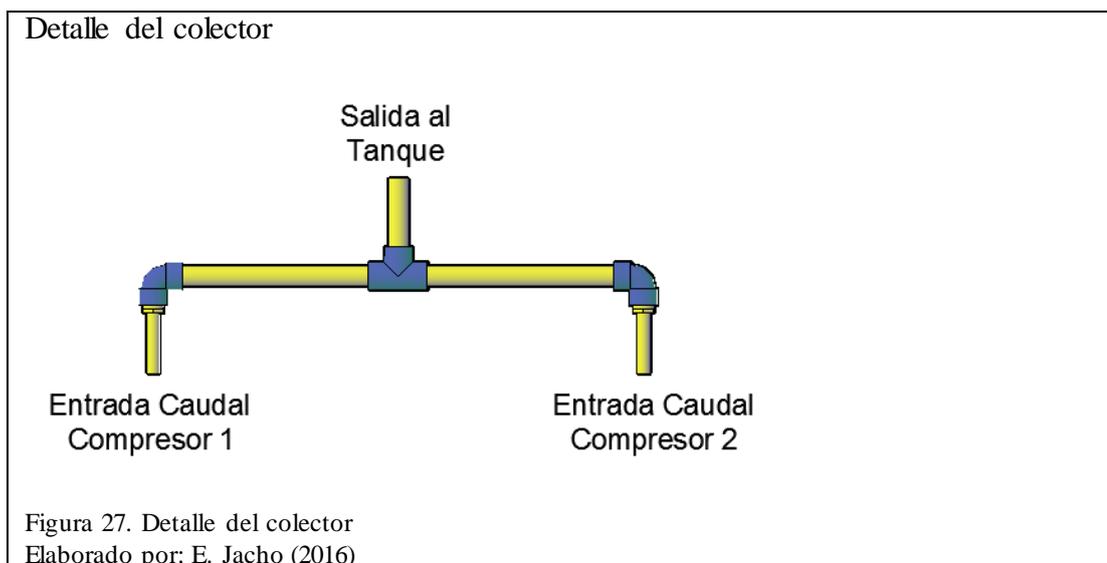
En el diagrama de la figura 26 se podrá observar la recopilación de los equipos seleccionados. Se muestra, como estará configurado el sistema de generación de aire comprimido incluyendo los equipos actuales.



Al tener dos o más compresores es necesario seleccionar el diámetro de la tubería que será usada como colector (manifold, detallado en la figura 27), es decir, la tubería que una los flujos entregado por los compresores y lo dirija al tanque. Para este caso, el diámetro de la tubería seleccionada será de 2 pulgadas, por las siguientes razones:

- ❖ El agujero del ingreso de aire en el tanque es de 2 pulgadas. Y si se instala tubería más grande, en este punto (entrada del tanque) la sección se reduciría y se producirá un estrangulamiento del flujo.
- ❖ Los diámetros de las secciones de la tubería que parte de los compresores es de 1,25 pulgadas, inferior al diámetro de la tubería seleccionada para ser colector que es 2 pulgadas.

El material seleccionado para el manifold es acero galvanizado, pues el mismo es maleable y soporta presiones superiores a la presión de trabajo.



### 2.2.8. Dimensionamiento de las tuberías

Mediante la ecuación 9 es posible calcular una aproximación del diámetro interior de la tubería, que se necesita para la red:

$$d = \sqrt[5]{(1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{\Delta P \times P_{\text{trabajo}}})}$$

Pero antes, es necesario determinar mediante un bosquejo y posteriormente planos (anexo 6), cual es la propuesta del rediseño de la red de aire comprimido, es decir, la nueva distribución y estructuración del anillo en la nave industrial.

A continuación se presentará en la figura 28, el bosquejo de la distribución del aire en la nave industrial y sus diferentes líneas.

Bosquejo del rediseño de la red de aire comprimido

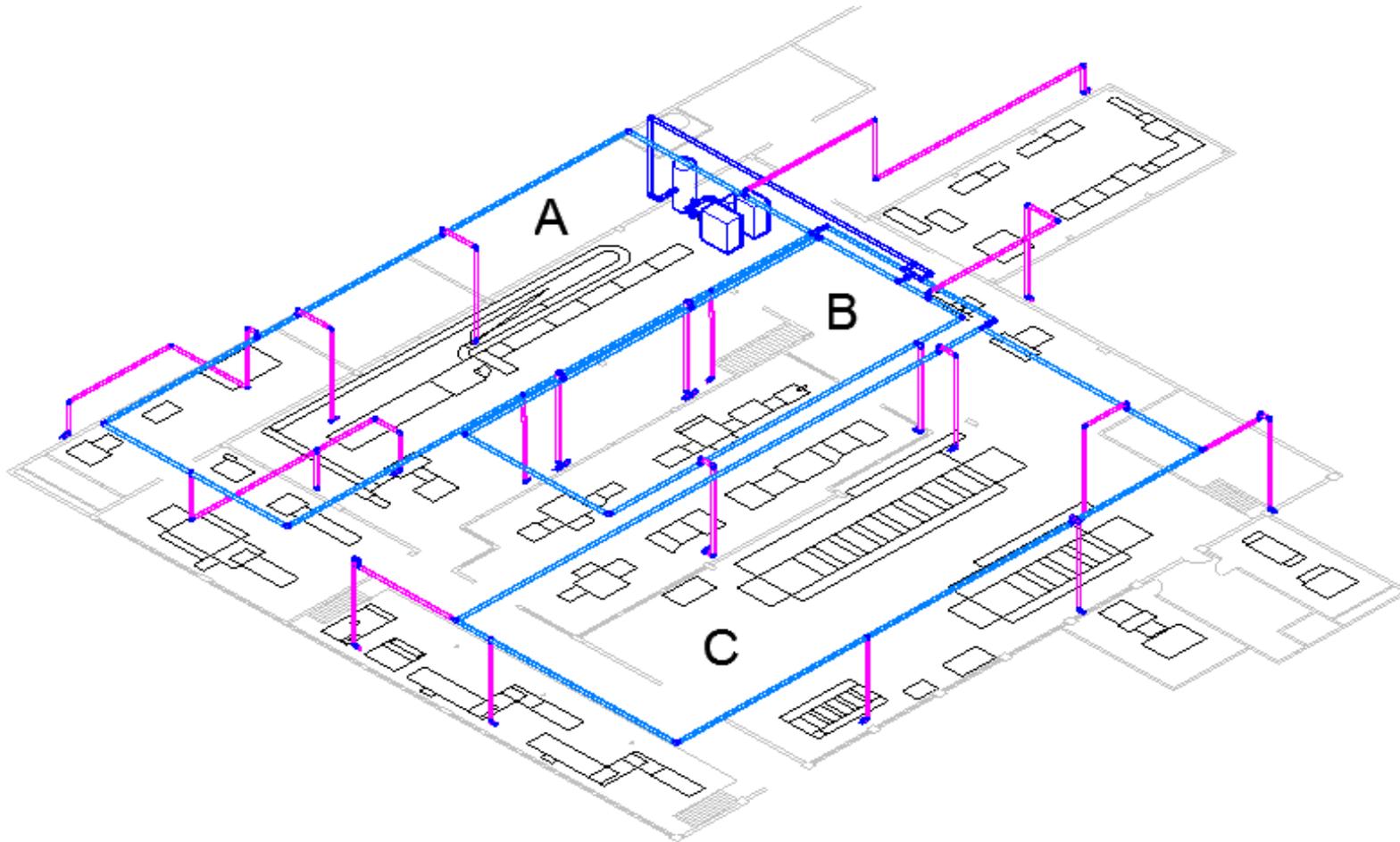
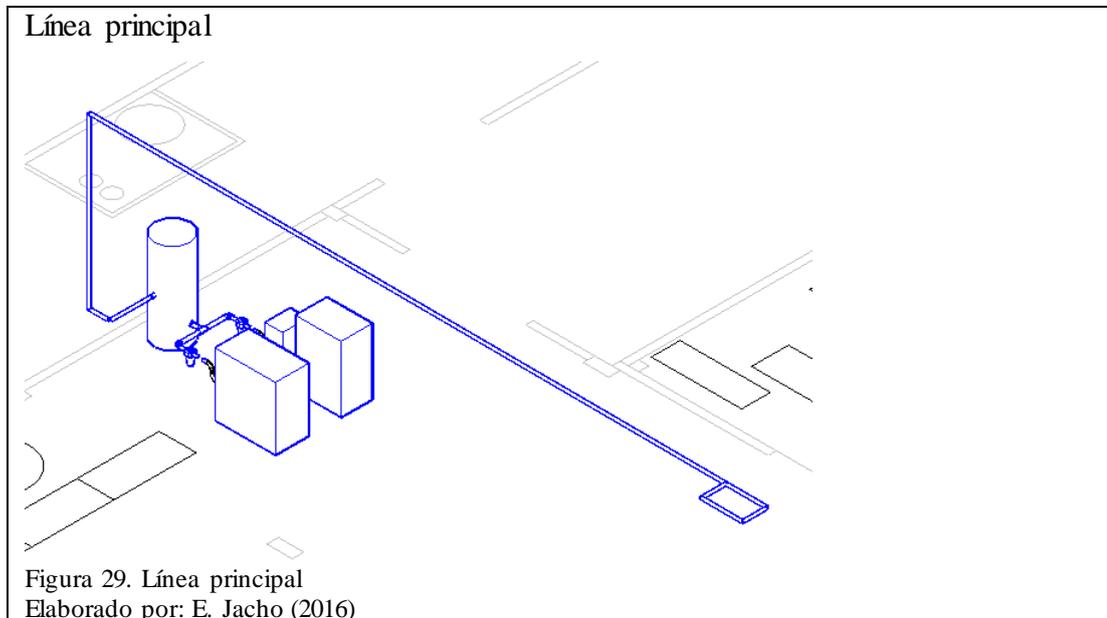
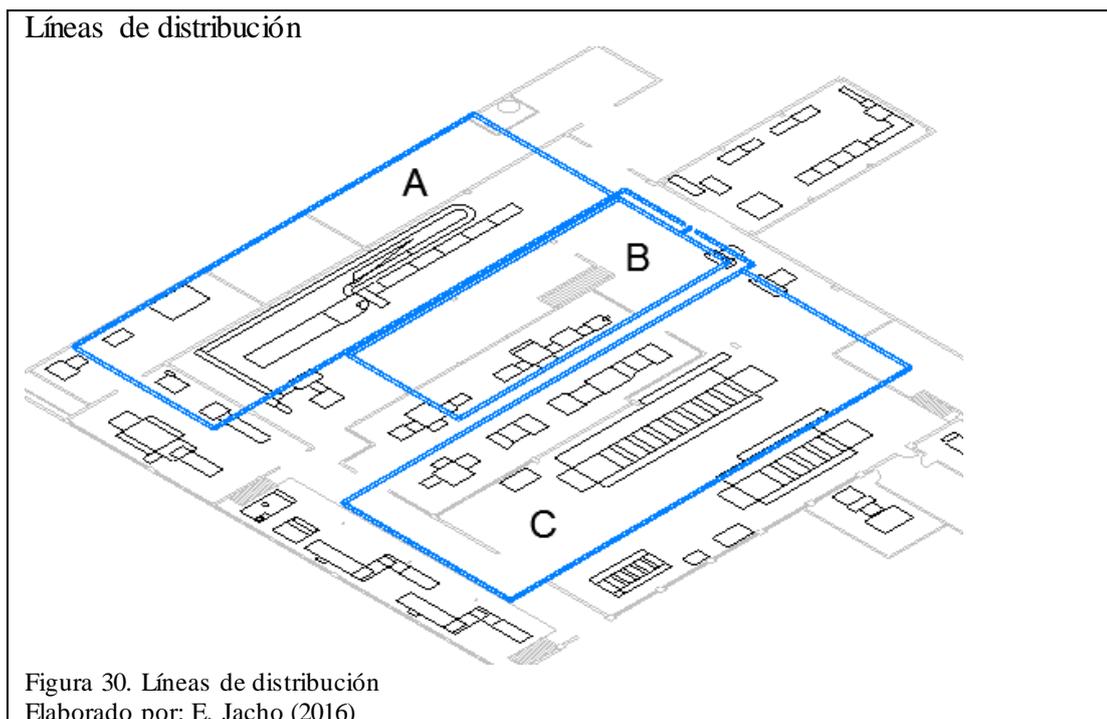


Figura 28. Bosquejo del rediseño de la red de aire comprimido  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

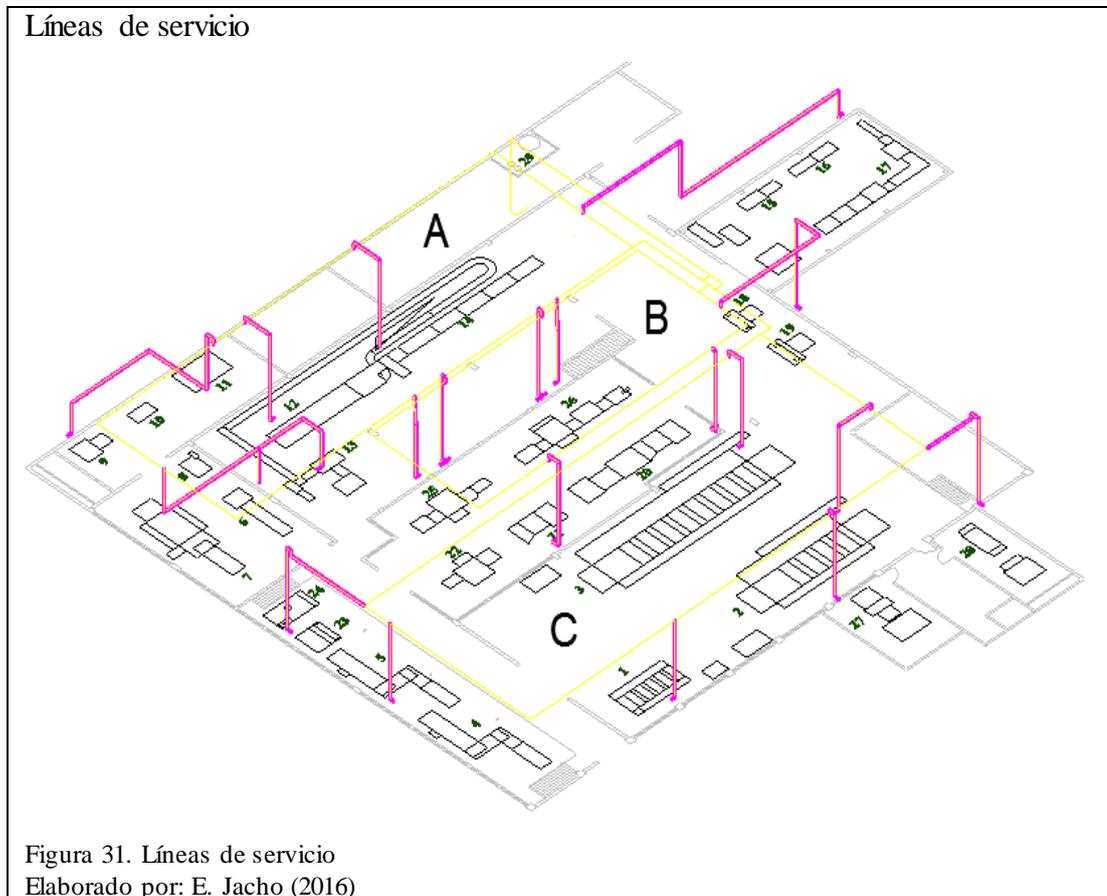
A partir del mismo se pueden localizar los puntos de partida y finalización de las diferentes líneas: principal, de distribución y de servicios, adquiriendo como información primordial, las longitudes de tubería requerida, la cantidad de accesorios necesaria y de qué tipo. Y se puede observar la presencia de tres anillos independientes que se unen por medio de una tubería principal (figura 29) hacia el tanque principal.



La necesidad de estos tres anillos es independizar por completo las tres áreas bien definidas en la empresa. De acuerdo con la figura 30, los anillos A, B y C alimentan las áreas: encuadernación, digital y prensas, respectivamente.



De los anillos partirán las ramificaciones hacia los lugares determinados, siendo estas líneas las responsables de llevar el fluido presurizado a las máquinas, denominadas las líneas de servicio y que se muestran en la figura 31.



En el anexo 6 - planos 4, se detallan todas las líneas de la configuración de la red de aire comprimido y la longitud de cada una.

Como se había explicado en el capítulo anterior, el desarrollo de los cálculos empezará obteniéndose el diámetro más grande (línea principal), y se debe tomar en cuenta que el fluido al transportarse por dicha línea, su presión disminuirá al llegar a las líneas de distribución, produciéndose una caída de presión. Reduciendo la presión de trabajo para el desarrollo de los siguientes cálculos.

Las pérdidas de presión en el sistema de aire comprimido se han establecido de la siguiente manera:

|                     |           |   |            |
|---------------------|-----------|---|------------|
| Secador             | 2,0 [psi] | = | 0,20 [bar] |
| Filtro              | 3,0 [psi] | = | 0,20 [bar] |
| Red principal       |           |   | 0,06 [bar] |
| Red de distribución |           |   | 0,02 [bar] |
| Red de servicio     |           |   | 0,02 [bar] |
| Total:              |           |   | 0,50 [bar] |

Cabe mencionar que a pesar de que la caída de presión en la red principal es relativamente alta (0.06 [bar]), no supera la pérdida de presión general, que los estudios sugieren, pues en toda la red de distribución (líneas: principal, de distribución y de servicio) el valor total es iguala 0,1 [bar].

### 2.2.8.1. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea principal

A continuación se enlistará los resultados obtenidos durante este proceso, tomando en cuentas las unidades, a las que requiere la ecuación 9 para su desarrollo:

$$d = \sqrt[5]{(1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{\Delta P \times P_{\text{trabajo}})}$$

Tabla 18.

Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de la red principal

|                       |                         | Caída Presión<br>[bar] | Presión Trabajo<br>[PSI] | Presión atm.<br>[bar]    |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                       |                         | 0,06                   | 120                      | 0,717                    |
| Q corregido<br>[m3/s] | Longitud<br>tubería [m] | Caída Presión<br>[Pa]  | Presión Trabajo<br>[Pa]  | Presión<br>absoluta [Pa] |
| 0,07785               | 23                      | 6000                   | 827369,38                | 899069,38                |

Nota: En la presente tabla se detallan los datos que se necesitan para el cálculo del diámetro de la tubería para la red principal, en las unidades requeridas.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

$$d = 0,03602 \text{ m}$$

Por lo tanto el diámetro interior calculado es de 36,02 mm, sin embargo en el mercado no existe un tubo con esa medida de diámetro interior, así que el diámetro nominal escogido dependerá del valor calculado y del material del tubo.

Por tal motivo, como el material escogido es la tubería de aluminio de Legris Transair. Su diámetro comercial es de 40 mm.

2.2.8.1.1. *Cálculo de la pérdida de carga adicional causada por los accesorios en general instalados en la línea de suministro*

Mediante la tabla 4 longitud equivalente de tubería, se procede con el cálculo de la pérdida de carga adicional que causan los accesorios instalados en la red de distribución. A continuación en la tabla 19 se detallan los accesorios y la longitud equivalente resultante.

Tabla 19.  
Accesorios y longitud equivalente de línea principal

| 40 mm | Tipo de accesorio | Cantidad | Longitud equivalente (Le) | Longitud (metros) |
|-------|-------------------|----------|---------------------------|-------------------|
|       | Codos             | 4        | 2,5                       | 10,0              |
|       | Pieza en T        | 1        | 3                         | 3,0               |
|       | Válvulas bola     | 1        | 0,5                       | 0,5               |
|       |                   |          |                           | 13,5              |

Nota: En la tabla se detallan los tipos de accesorios que conforman la línea principal y la longitud equivalente total que generan estos elementos.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

2.2.8.1.2. *Determinación y comprobación del diámetro mediante la utilización de la fórmula y un nomograma*

Mediante la ecuación 9 se recalcula el diámetro interior de la tubería, tomando en cuenta que la longitud de la misma ha aumentado por el valor equivalente correspondiente a los accesorios de la línea principal, obteniéndose un resultado de:

$$d = 0,0395 \text{ m}$$

Y con la ayuda del nomograma de la figura 14, se procede con la comprobación del diámetro recalculado. Para lo cual se requiere los siguientes datos:

|                                       |                            |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Longitud de tubería                   | (23 + 13,5) [m] = 36,5 [m] |
| Caudal                                | 280,3 [ $\frac{m^3}{h}$ ]  |
| Presión manométrica del sistema [bar] | 8 [bar]                    |
| Presión absoluta del sistema [Pa]     | 899069 [Pa]                |
| Caída de presión                      | 0,06 [bar]                 |

Cálculo del diámetro de la tubería de la línea principal mediante nomograma

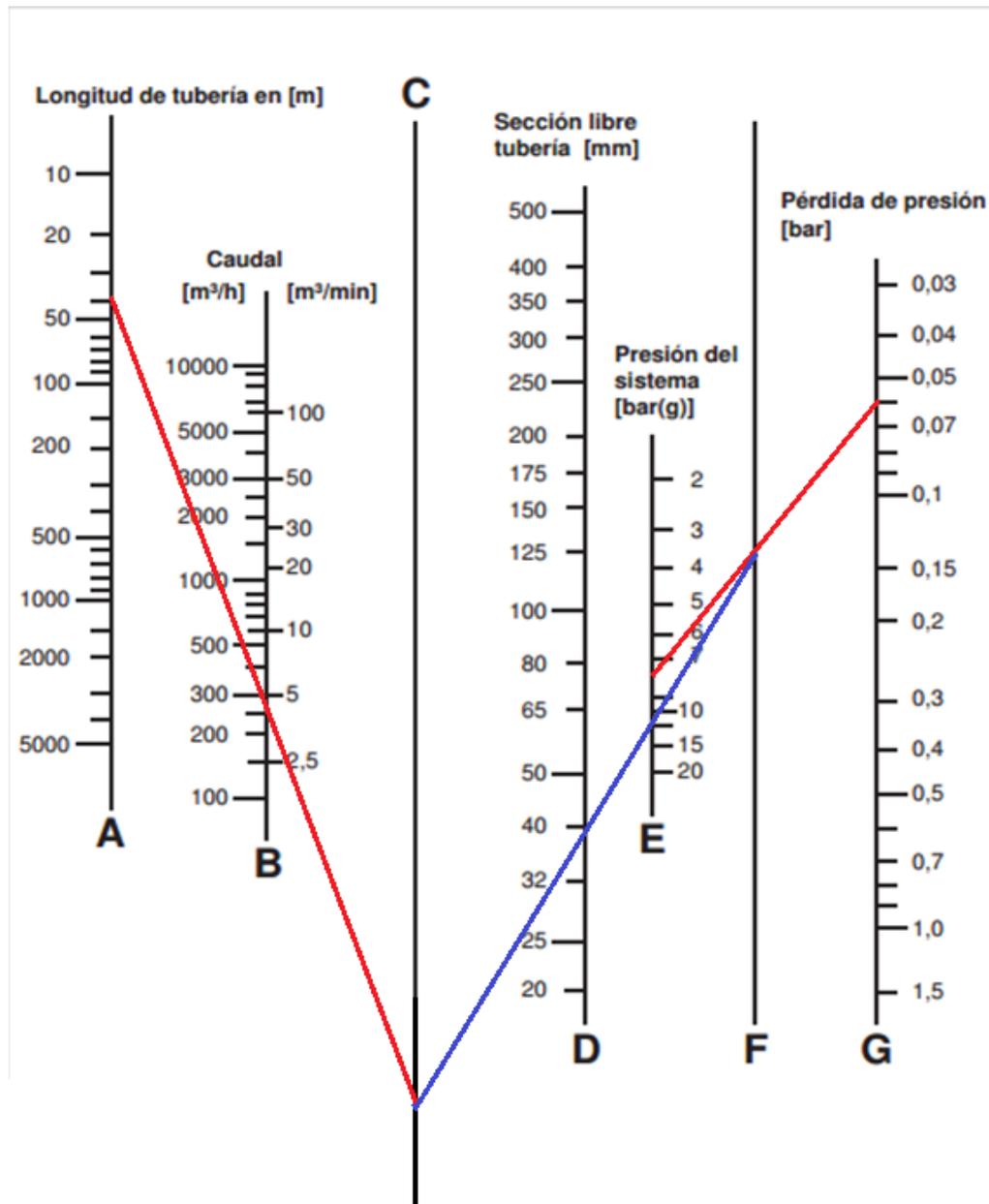


Figura 32. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea principal mediante nomograma  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

El resultado obtenido en el cálculo y en el nomograma es un diámetro de tubería cercano a 40 milímetros. Y efectivamente la tubería seleccionada para los cálculos fue de 40 milímetros. Por tal motivo la medida seleccionada es la más indicada.

2.2.8.1.3. Cálculo de la caída de presión final de la línea principal

Para verificar que los resultados son los correctos se procederá con el cálculo de la caída de presión que se produce con los valores adquiridos, mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta P = (1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{d^5 \times P_{\text{trabajo}}})$$

$$\Delta P = 0,05895 \text{ [bar]}$$

El valor obtenido es menor a la caída de presión establecida (0,06 bar), para el rediseño, por tal motivo el diámetro escogido es el correcto

### 2.2.8.2. Cálculo del diámetro de la tubería de las líneas de distribución

Como se había explicado anteriormente las líneas de distribución estas divididas en tres anillos independientes. El desarrollo de los cálculos se los realizará paralelamente, después de establecer los caudales de cada anillo.

Tabla 20.  
Caudales de los tres anillos de distribución

|                   | Encuadernación | Digital | Prensas |
|-------------------|----------------|---------|---------|
| Caudal (Q) [m3/s] | 0,02883        | 0,01983 | 0,02922 |
| Caudal (Q) [m3/h] | 103,8          | 71,4    | 105,2   |

Nota: La tabla detalla el consumo volumétrico, en dos diferentes unidades, que requieren los tres anillos de distribución, pero independiente el uno del otro, tomando en cuenta las máquinas de cada área y el consumo de cada una.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

A continuación se detallan los datos que se deben conocer para los cálculos:

Tabla 21.  
Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de los tres anillo

Encuadernación

|                    |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atmosférica [bar] |
|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
|                    |                      | 0,02                | 119,13                | 0,717                     |
| Q corregido [m3/s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta [Pa]     |
| 0,02883            | 47,01                | 2000                | 821369,39             | 893069,39                 |

Digital

|                    |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atmosférica [bar] |
|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
|                    |                      | 0,02                | 119,13                | 0,717                     |
| Q corregido [m3/s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta [Pa]     |
| 0,01983            | 30,00                | 2000                | 821369,39             | 893069,39                 |

Prensas

|                                 |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atmosférica [bar] |
|---------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
|                                 |                      | 0,02                | 119,13                | 0,717                     |
| Q corregido [m <sup>3</sup> /s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta [Pa]     |
| 0,02922                         | 48,81                | 2000                | 821369,39             | 893069,39                 |

Nota: En la presente tabla se detallan los datos que se necesitan para el cálculo de los diámetros de las tres tuberías para los anillos de distribución y en las unidades requeridas.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Tabla 22.

Resultados de diámetros calculados

| Áreas de trabajo | Diámetros de tubería calculados |
|------------------|---------------------------------|
| Encuadernación   | 0,03589 m                       |
| Digital          | 0,02857 m                       |
| Prensas          | 0,03635 m                       |

Nota: En la tabla se presentan los resultados de los cálculos realizados para obtener las medidas de los diámetros de las tuberías de los tres anillos de distribución.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Por lo tanto los diámetros interiores calculados son: 35,89 mm, 28,57 mm y 36,35 mm para los departamentos de encuadernación, digital y prensas respectivamente. Sin embargo en el mercado no existe un tubo con esa medida de diámetro interior, así que el diámetro nominal escogido dependerá de una medida comercial.

Como el material escogido es la tubería de aluminio de Legris Transair, cuyo diámetro comercial es de 40 milímetros para los tres anillos ya que una medida menor al seleccionado es 25 mm y si se selecciona una tubería de esa medida generaría una caída de presión fuera de los parámetros establecidos. Eso se estableció en el proceso iterativo.

#### 2.2.8.2.1. Cálculo de la pérdida de carga adicional causada por los accesorios en general instalados en las líneas de distribución

En la tabla 23 se puede apreciar el detalle de la cantidad de accesorios y la longitud equivalente total de cada anillo de las líneas de distribución.

Tabla 23.  
Accesorios y longitud equivalente de líneas de distribución

| Encuadernación |                   |          |                           |                   |
|----------------|-------------------|----------|---------------------------|-------------------|
| 40 mm          | Tipo de accesorio | Cantidad | Longitud equivalente (Le) | Longitud (metros) |
|                | Codos             | 3        | 2,5                       | 7,5               |
|                | T's recto         | 2        | 3                         | 6,0               |
|                | Válvulas bola     | 1        | 0,5                       | 0,5               |
|                |                   |          |                           | 14,0              |
| Digital        |                   |          |                           |                   |
| 40 mm          | Tipo de accesorio | Cantidad | Longitud equivalente (Le) | Longitud (metros) |
|                | Codos             | 2        | 2,5                       | 5,0               |
|                | T's recto         | 2        | 3                         | 6,0               |
|                | Válvulas bola     | 1        | 0,5                       | 0,5               |
|                |                   |          |                           | 11,5              |
| Prensas        |                   |          |                           |                   |
| 40 mm          | Tipo de accesorio | Cantidad | Longitud equivalente (Le) | Longitud (metros) |
|                | Codos             | 3        | 2,5                       | 7,5               |
|                | T's recto         | 2        | 3                         | 6,0               |
|                | Válvulas bola     | 1        | 0,5                       | 0,5               |
|                |                   |          |                           | 14,0              |

Nota: En la tabla se detallan los tipos de accesorios que conforman las deferentes líneas de distribución y las longitudes equivalentes totales que generan estos elementos en cada anillo.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

#### 2.2.8.2.2. Determinación y comprobación del diámetro mediante la utilización de la fórmula y un nomograma

Mediante la ecuación 9 se recalculan los diámetros interiores de las tuberías, tomando en cuenta que las longitudes de las mismas han aumentado por los valores equivalentes correspondientes a los accesorios de cada línea de distribución, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 24:

Tabla 24.  
Resultados de diámetros calculados y recalculados del proceso iterativo

| Áreas de trabajo | Diámetros de tubería calculados inicialmente | Diámetros de tubería recalculados |
|------------------|--|-----------------------------------|
| Encuadernación   | 35,89 m                                      | 37,38 mm                          |
| Digital          | 28,57 m                                      | 30,48 mm                          |
| Prensas          | 36,35 m                                      | 38,23 mm                          |

Nota: En esta tabla se presentan los resultados obtenidos en el cálculo inicial de los diámetros de las tuberías y los resultados de los diámetros recalculados de las tres áreas de trabajo para notar el incremento de las medidas en el proceso iterativo de cálculo.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

Con la ayuda del nomograma de la figura 14, se procede con la comprobación del cálculo, del nuevo diámetro. Para lo cual se requiere los siguientes datos:

Encuadernación

| Datos               | Valor  |
|---------------------|--|
| Longitud de tubería | $(47,01 + 14,0) \text{ [m]} = 61,01 \text{ [m]}$   |
| Caudal              | $103,8 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$ |
| Presión del sistema | 8 [bar]  |
| Caída de presión    | 0,02 [bar]   |

Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área encuadernación) mediante nomograma

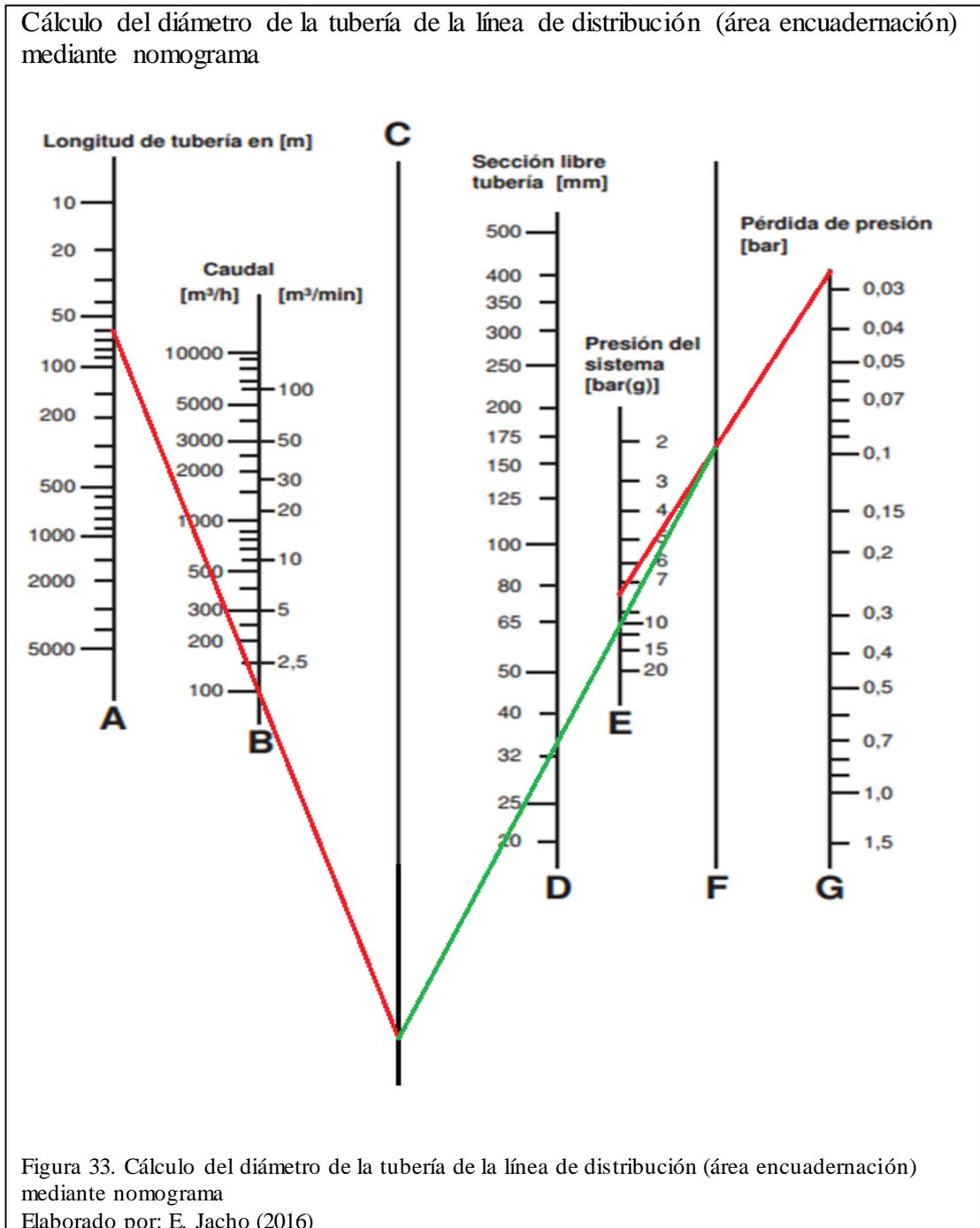


Figura 33. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área encuadernación) mediante nomograma

Elaborado por: E. Jacho (2016)

El resultado obtenido en el nomograma es un diámetro de tubería inferior a 40 milímetros. Y efectivamente la tubería seleccionada para los cálculos fue de 40 milímetros. Por tal motivo la medida seleccionada es la indicada.

Digital

| Datos               | Valor   |
|---------------------|---|
| Longitud de tubería | $(30 + 11,5) \text{ [m]} = 41,5 \text{ [m]}$    |
| Caudal              | $71,4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]$ |
| Presión del sistema | 8 [bar]   |
| Caída de presión    | 0,02 [bar]                                      |

Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área digital) mediante nomograma

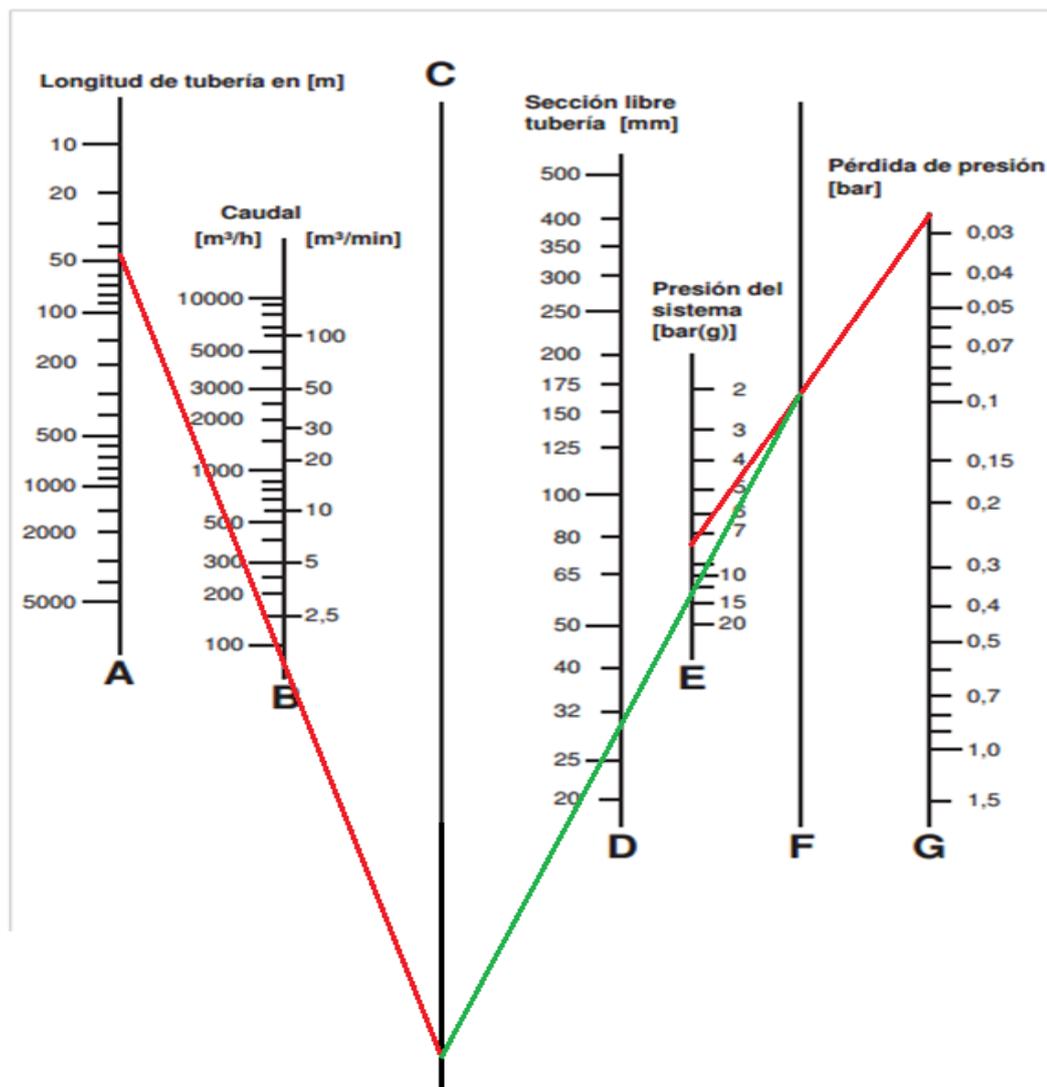


Figura 34. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área digital) mediante nomograma

Elaborado por: E. Jacho (2016)

El resultado obtenido en el nomograma es un diámetro de tubería inferior a 40 milímetros y cercano a 30 milímetros. Por tal razón la medida de la tubería seleccionada y la más indicada que se utilizó para los cálculos fue de 40 milímetros.

### Prensas

| Datos               | Valor  |
|---------------------|--|
| Longitud de tubería | $(48,81 + 14) \text{ [m]} = 62,81 \text{ [m]}$     |
| Caudal              | $105,2 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$ |
| Presión del sistema | 8 [bar]  |
| Caída de presión    | 0,02 [bar]   |

Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área prensas) mediante nomograma

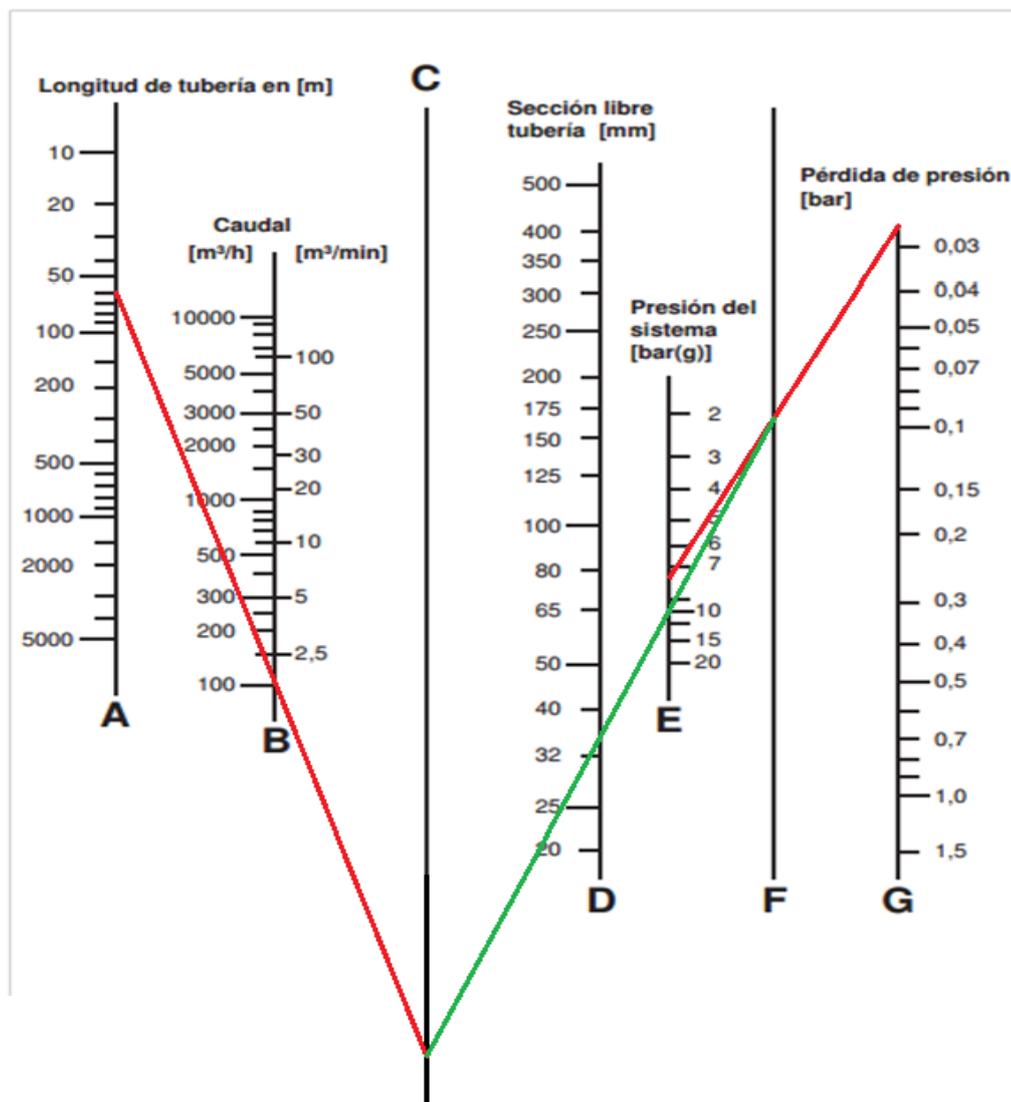


Figura 35. Cálculo del diámetro de la tubería de la línea de distribución (área prensas) mediante nomograma

Elaborado por: E. Jacho (2016)

El resultado obtenido en el nomograma es un diámetro de tubería inferior a 40 milímetros y superior a 30 milímetros. Por tal razón la medida de la tubería seleccionada y la más indicada que se utilizó para los cálculos fue de 40 milímetros.

### 2.2.8.2.3. Cálculo de la caída de presión final para las líneas de distribución

Por último se verifica que los resultados cumplan con los requisitos establecidos y para ello se procederá con el cálculo de la caída de presión que se produce con los valores adquiridos, mediante la siguiente fórmula y que se muestran en la tabla 25:

$$\Delta P = (1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{d^5 \times P_{\text{trabajo}}})$$

Tabla 25.  
Resultados de las caídas de presión calculadas

| Áreas de trabajo | Caídas de presión calculadas |
|------------------|------------------------------|
| Encuadernación   | $\Delta P = 0,015$ [bar]     |
| Digital          | $\Delta P = 0,005$ [bar]     |
| Prensas          | $\Delta P = 0,016$ [bar]     |

Nota: En la tabla se presentan los valores calculados de las caídas de presión que se generarán en los tres anillos de distribución.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Los valores obtenidos son menores a las caídas de presión establecidas (0,02 bar), para el rediseño, por tal motivo los diámetros escogidos son los correctos.

### 2.2.8.3. Cálculo del diámetro de la tubería de las líneas de servicio

Para el cálculo de las líneas de servicio a continuación se detallarán los siguientes datos indispensables para el desarrollo (tabla 26), tomando en cuenta que el fluido al transportarse por la línea de distribución, la presión en la entrada de la línea de servicio disminuye en 0,02 [bar], por tal motivo el sistema trabajará con una presión de 118,84 [psi].

Tabla 26.

Recopilación de datos para el cálculo del diámetro de las líneas de servicio

| Puntos de servicio                         |                        | Consumo volumétrico | Longitud de tubería |
|--|------------------------|---------------------|---------------------|
| Número                                     | Nombre                 | [m <sup>3</sup> /s] | [metros]            |
| <b>Anillo A, Área de encuadernación</b>    |                        |                     |                     |
| 1  | Acabados               | 0,00600             | 4,60                |
| 2  | Pasta dura             | 0,00600             | 4,60                |
| 3  | Serigráfica-trilateral | 0,00727             | 21,82               |
| 4  | Laminadora             | 0,00378             | 18,10               |
| 5  | Encoladora             | 0,00467             | 7,30                |
| 6  | Alzadora               | 0,00833             | 7,40                |
| 7  | Grapadora              | 0,00600             | 24,90               |
| <b>Anillo B, Área de impresión digital</b> |                        |                     |                     |
| 8  | Guillotinas            | 0,00600             | 14,80               |
| 9  | Cartes GT              | 0,00789             | 5,52                |
| 10   | Indigo HP 5000         | 0,00789             | 6,50                |
| 11   | Indigo HP 7000         | 0,00789             | 5,75                |
| 12   | Indigo HP W6000        | 0,01780             | 5,80                |
| <b>Anillo C, Área de prensas</b>           |                        |                     |                     |
| 13   | Prensa SX8-103         | 0,00429             | 6,40                |
| 14   | Prensa CD4-102         | 0,00429             | 7,85                |
| 15   | Trendsetter            | 0,00918             | 9,25                |
| 16   | Suprasetter            | 0,00918             | 5,65                |
| 17   | Ryobi                  | 0,00429             | 5,50                |
| 18   | Plegadoras             | 0,00600             | 5,60                |
| 19   | Acabados digital       | 0,00600             | 11,50               |

Nota: En la tabla se detalla los puntos de servicio de la red de aire comprimido, el consumo volumétrico de cada uno y su respectiva longitud de tubería, necesarios para calcular los diferentes diámetros de tubería.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Para el consumo volumétrico se tomó en cuenta el valor más alto que podría pasar por cada línea de servicio y la longitud de tubería se la adquirió mediante el plano realizado (Anexo 6 – Plano 4). También se ordenaron los puntos de conexión de acuerdo a su ubicación, clasificándolos en los tres anillos anteriormente descritos. Con estos antecedentes y con la fórmula conocida (ecuación 9), se adquirieron los valores de diámetros y se los aproximaron a los diámetros comerciales, detallados a continuación en la tabla 27:

Tabla 27.

Cálculo del diámetro de las líneas de servicio

Anillo A

|                        |                    |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atm. [bar]     |              |               |                    |
|------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------|---------------|--------------------|
|                        |                    |                      | 0,02                | 118,84                | 0,717                  |              |               |                    |
| Líneas de servicio     | Q corregido [m3/s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta. [Pa] | Diámetro [m] | Diámetro [mm] | Diámetro comercial |
| Acabados               | 0,00600            | 4,60                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01262      | 12,62         | 16,50              |
| Pasta dura             | 0,00600            | 4,60                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01262      | 12,62         | 16,50              |
| Serigráfica-trilateral | 0,00727            | 21,82                | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01850      | 18,50         | 25,00              |
| Laminadora             | 0,00378            | 18,10                | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01399      | 13,99         | 16,50              |
| Encoladora             | 0,00467            | 7,30                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01262      | 12,62         | 16,50              |
| Alzadora               | 0,00833            | 7,40                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01567      | 15,67         | 25,00              |
| Grapadora              | 0,00600            | 24,90                | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01769      | 17,69         | 25,00              |

Anillo B

|                    |                    |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atm. [bar]     |              |               |                    |
|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------|---------------|--------------------|
|                    |                    |                      | 0,02                | 118,84                | 0,717                  |              |               |                    |
| Líneas de servicio | Q corregido [m3/s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta. [Pa] | Diámetro [m] | Diámetro [mm] | Diámetro comercial |
| Guillotinas        | 0,00600            | 14,80                | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01594      | 15,94         | 25,00              |
| Cartes GT          | 0,00789            | 5,52                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01449      | 14,49         | 25,00              |
| Indigo HP 5000     | 0,00789            | 6,50                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01497      | 14,97         | 25,00              |
| Indigo HP 7000     | 0,00789            | 5,75                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01460      | 14,60         | 25,00              |
| Indigo HP W6000    | 0,01780            | 5,80                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01977      | 19,77         | 25,00              |

Anillo C

|                    |                                 |                      | Caída Presión [bar] | Presión Trabajo [PSI] | Presión atm. [bar]     |              |               |                    |
|--------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------|---------------|--------------------|
|                    |                                 |                      | 0,02                | 118,84                | 0,717                  |              |               |                    |
| Líneas de servicio | Q corregido [m <sup>3</sup> /s] | Longitud tubería [m] | Caída Presión [Pa]  | Presión Trabajo [Pa]  | Presión absoluta. [Pa] | Diámetro [m] | Diámetro [mm] | Diámetro comercial |
| Prensa SX8-103     | 0,00429                         | 6,40                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01191      | 11,91         | 16,50              |
| Prensa CD4-102     | 0,00429                         | 7,85                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01241      | 12,41         | 16,50              |
| Trendsetter        | 0,00918                         | 9,25                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01699      | 16,99         | 25,00              |
| Suprasetter        | 0,00918                         | 6,65                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01590      | 15,90         | 25,00              |
| Ryobi              | 0,00429                         | 5,50                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01155      | 11,55         | 16,50              |
| Plegadoras         | 0,00600                         | 5,60                 | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01313      | 13,13         | 16,50              |
| Acabados digital   | 0,00600                         | 11,50                | 2000                | 819369,40             | 891069,396             | 0,01516      | 15,16         | 25,00              |

Nota: En la presente tabla se detallan los datos que se necesitan para el cálculo de los diámetros de las líneas de servicio y los resultados de los mismos. Además en la columna de Diámetro comercial (los cuadros pintados de color verde), se da a conocer los diámetros de tuberías seleccionados y que existen comercialmente, en unidades milimétricas. Elaborado por: E. Jacho (2016)

2.2.8.3.1. Cálculo de la pérdida de carga adicional causada por los accesorios en general instalados en la línea de suministro

A continuación en la tabla 28 se detallan los accesorios de las 19 líneas de servicio y las longitudes equivalentes totales de cada una.

Tabla 28.

Accesorios y longitud equivalente de las líneas de servicio

| Puntos de servicio |                        | Ø de Tubería<br>[mm] | Accesorios |         |                 |                   |                 |                         |             |            |                   |                |               |                      |       |
|--------------------|------------------------|----------------------|------------|---------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------|------------|-------------------|----------------|---------------|----------------------|-------|
| Num.               | Nombre                 |                      | N. de T's  | Leq x T | Leq total x T's | N. de reducciones | Leq x reducción | Leq total x reducciones | N. de codos | Leq x codo | Leq total x codos | N. de válvulas | Leq x válvula | Leq total x válvulas | TOTAL |
| <b>Anillo A</b>    |                        |                      |            |         |                 |                   |                 |                         |             |            |                   |                |               |                      |       |
| 1                  | Acabados               | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 1           | 1,30       | 1,30              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 5,50  |
| 2                  | Pasta dura             | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 1           | 1,30       | 1,30              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 5,50  |
| 3                  | Serigráfica-trilateral | 25,00                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 4           | 1,50       | 6,00              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 13,20 |
| 4                  | Laminadora             | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 6           | 1,30       | 7,80              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 12,00 |
| 5                  | Encoladora             | 16,50                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 2           | 1,30       | 2,60              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 9,80  |
| 6                  | Alzadora               | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,50       | 4,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 8,70  |
| 7                  | Grapadora              | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 5           | 1,50       | 7,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 11,70 |
| <b>Anillo B</b>    |                        |                      |            |         |                 |                   |                 |                         |             |            |                   |                |               |                      |       |
| 8                  | Guillotinas            | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 4           | 1,50       | 6,00              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 10,20 |
| 9                  | Cartes GT              | 25,00                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 2           | 1,50       | 3,00              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 10,20 |
| 10                 | Indigo HP 5000         | 25,00                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,50       | 4,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 11,70 |
| 11                 | Indigo HP 7000         | 25,00                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,50       | 4,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 11,70 |
| 12                 | Indigo HP W6000        | 25,00                | 2          | 3,00    | 6,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,50       | 4,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 11,70 |
| <b>Anillo C</b>    |                        |                      |            |         |                 |                   |                 |                         |             |            |                   |                |               |                      |       |
| 13                 | Prensa SX8-103         | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,30       | 3,90              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 8,10  |
| 14                 | Prensa CD4-102         | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,30       | 3,90              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 8,10  |
| 15                 | Trendsetter            | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 4           | 1,50       | 6,00              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 10,20 |
| 16                 | Suprasetter            | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,50       | 4,50              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 8,70  |
| 17                 | Ryobi                  | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 3           | 1,30       | 3,90              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 8,10  |
| 18                 | Plegadoras             | 16,50                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 1           | 1,30       | 1,30              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 5,50  |
| 19                 | Acabados digital       | 25,00                | 1          | 3,00    | 3,00            | 1                 | 0,90            | 0,90                    | 4           | 1,50       | 6,00              | 1              | 0,30          | 0,30                 | 10,20 |

Nota: En la tabla se detallan los tipos de accesorios que conforman las diferentes líneas de servicio y las longitudes equivalentes totales que generan estos elementos en cada una (en los cuadros de color verde).

Elaborado por: E. Jacho (2016)

A continuación en la tabla 29 se detallan el consumo volumétrico de las 19 líneas de servicio y las longitudes totales de cada una.

Tabla 29.

Longitudes totales de las líneas de servicio

| Puntos de servicio |                        | Consumo volumétrico | Longitud de tubería | Longitud Equivalente | Total longitud |
|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| Número             | Nombre                 | [m <sup>3</sup> /s] | [metros]            | [metros]             | [metros]       |
| <b>Anillo A</b>    |                        |                     |                     |                      |                |
| 1                  | Acabados               | 0,00600             | 4,60                | 5,50                 | 10,10          |
| 2                  | Pasta dura             | 0,00600             | 4,60                | 5,50                 | 10,10          |
| 3                  | Serigráfica-trilateral | 0,00727             | 21,82               | 13,20                | 35,02          |
| 4                  | Laminadora             | 0,00378             | 18,10               | 12,00                | 30,10          |
| 5                  | Encoladora             | 0,00467             | 7,30                | 9,80                 | 17,10          |
| 6                  | Alzadora               | 0,00833             | 7,40                | 8,70                 | 16,10          |
| 7                  | Grapadora              | 0,00600             | 24,90               | 11,70                | 36,60          |
| <b>Anillo B</b>    |                        |                     |                     |                      |                |
| 8                  | Guillotinas            | 0,00600             | 14,80               | 10,20                | 25,00          |
| 9                  | Cartes GT              | 0,00789             | 5,82                | 10,20                | 16,02          |
| 10                 | Indigo HP 5000         | 0,00789             | 6,50                | 11,7                 | 18,20          |
| 11                 | Indigo HP 7000         | 0,00789             | 5,75                | 11,7                 | 17,45          |
| 12                 | Indigo HP W6000        | 0,01780             | 5,80                | 11,7                 | 17,50          |
| <b>Anillo C</b>    |                        |                     |                     |                      |                |
| 13                 | Prensa SX8-103         | 0,00429             | 6,40                | 8,10                 | 14,50          |
| 14                 | Prensa CD4-102         | 0,00429             | 7,85                | 8,10                 | 15,95          |
| 15                 | Trendsetter            | 0,00918             | 9,25                | 10,20                | 19,45          |
| 16                 | Suprasetter            | 0,00918             | 5,65                | 8,70                 | 14,35          |
| 17                 | Ryobi                  | 0,00429             | 5,50                | 8,10                 | 13,60          |
| 18                 | Plegadoras             | 0,00600             | 5,60                | 5,50                 | 11,10          |
| 19                 | Acabados digital       | 0,00600             | 11,50               | 10,20                | 21,70          |

Nota: En la tabla se detallan las líneas de servicio, el consumo volumétrico, su longitud de tubería, su longitud equivalente y las longitudes totales de cada una, valores necesarios para el proceso iterativo de cálculo.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 2.2.8.3.2. Determinación y comprobación del diámetro mediante la utilización de la fórmula

Mediante la ecuación 9 se recalculan los diámetros interiores de las tuberías, tomando en cuenta que las longitudes de las mismas han aumentado por los valores correspondientes a los accesorios de cada línea de servicio, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 30:

Tabla 30.

Resultados de diámetros calculados y recalculados del proceso iterativo

| Puntos de servicio |                        | Diámetros de tubería calculados | Diámetros de tubería recalculados |
|--------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Número             | Nombre                 | [milímetros]                    | [milímetros]                      |
| Anillo A           |                        |                                 |                                   |
| 1                  | Acabados               | 12,62                           | 14,77                             |
| 2                  | Pasta dura             | 12,62                           | 14,77                             |
| 3                  | Serigráfica-trilateral | 18,50                           | 20,34                             |
| 4                  | Laminadora             | 13,99                           | 15,49                             |
| 5                  | Encoladora             | 12,62                           | 14,96                             |
| 6                  | Alzadora               | 15,67                           | 18,31                             |
| 7                  | Grapadora              | 17,69                           | 19,11                             |
| Anillo B           |                        |                                 |                                   |
| 8                  | Guillotinas            | 15,94                           | 17,71                             |
| 9                  | Cartes GT              | 14,49                           | 17,93                             |
| 10                 | Indigo HP 5000         | 14,97                           | 18,39                             |
| 11                 | Indigo HP 7000         | 14,60                           | 18,24                             |
| 12                 | Indigo HP W6000        | 19,77                           | 24,65                             |
| Anillo C           |                        |                                 |                                   |
| 13                 | Prensa SX8-103         | 11,91                           | 14,03                             |
| 14                 | Prensa CD4-102         | 12,41                           | 14,30                             |
| 15                 | Trendsetter            | 16,99                           | 19,71                             |
| 16                 | Suprasetter            | 15,90                           | 18,55                             |
| 17                 | Ryobi                  | 11,55                           | 13,85                             |
| 18                 | Plegadoras             | 13,13                           | 15,05                             |
| 19                 | Acabados digital       | 15,16                           | 17,21                             |

Nota: En esta tabla se presentan los resultados obtenidos en el cálculo inicial de los diámetros de las tuberías y los resultados de los diámetros recalculados de las líneas de servicio para notar el incremento de las medidas en el proceso iterativo de cálculo.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 2.2.8.3.3. Cálculo de la caída de presión final para las líneas de servicio

Por último se verifica que los diámetros seleccionados cumplan con el requisito establecido de que la caída de presión en cada línea de servicio no supere el valor de 0,02 [Bar], con ayuda de los valores adquiridos anteriormente. Se empleará la siguiente fórmula:

$$\Delta P = (1.6 \times 10^3 \times (Q_{\text{corregido}})^{1.85} \times \frac{L_{\text{tubería}}}{d^5 \times P_{\text{trabajo}}})$$

Tabla 31.

Caída de presión en las líneas de servicio

Anillo A

|      |                        |                       |                  |                  | Presión T<br>[PSI] | Presión atm.<br>[bar] |                 |                        |
|------|------------------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|
|      |                        |                       |                  |                  | 118,91             | 0,717                 |                 |                        |
| Num. | Nombre                 | Q corregido<br>[m3/s] | L tubería<br>[m] | Diámetro<br>[mm] | Presión T<br>[Pa]  | Presión abs.<br>[Pa]  | Caída P<br>[Pa] | Caída Presión<br>[bar] |
| 1    | Acabados               | 0,00600               | 10,10            | 16,50            | 819861,10          | 891561,101            | 1149,34         | 0,0115                 |
| 2    | Pasta dura             | 0,00600               | 10,10            | 16,50            | 819861,10          | 891561,101            | 1149,34         | 0,0115                 |
| 3    | Serigráfica-trilateral | 0,00727               | 35,00            | 25,00            | 819861,10          | 891561,101            | 711,50          | 0,0071                 |
| 4    | Laminadora             | 0,00378               | 30,10            | 16,50            | 819861,10          | 891561,101            | 1457,05         | 0,0146                 |
| 5    | Encoladora             | 0,00467               | 17,10            | 16,50            | 819861,10          | 891561,101            | 1224,00         | 0,0122                 |
| 6    | Alzadora               | 0,00833               | 16,10            | 25,00            | 819861,10          | 891561,101            | 421,01          | 0,0042                 |
| 7    | Grapadora              | 0,00600               | 36,60            | 25,00            | 819861,10          | 891561,101            | 521,59          | 0,0052                 |

Anillo B

|      |                 |                       |                  |                  | Presión T<br>[PSI] | Presión atm.<br>[bar] |                 |                        |
|------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|
|      |                 |                       |                  |                  | 119,06             | 0,717                 |                 |                        |
| Num. | Nombre          | Q corregido<br>[m3/s] | L tubería<br>[m] | Diámetro<br>[mm] | Presión T<br>[Pa]  | Presión abs.<br>[Pa]  | Caída P<br>[Pa] | Caída Presión<br>[bar] |
| 8    | Guillotinas     | 0,00600               | 25,00            | 25,00            | 820857,01          | 892557,008            | 355,88          | 0,0036                 |
| 9    | Cartes GT       | 0,00789               | 16,00            | 25,00            | 820857,01          | 892557,008            | 378,00          | 0,0038                 |
| 10   | Indigo HP 5000  | 0,00789               | 18,20            | 25,00            | 820857,01          | 892557,008            | 429,98          | 0,0043                 |
| 11   | Indigo HP 7000  | 0,00789               | 17,45            | 25,00            | 820857,01          | 892557,008            | 412,26          | 0,0041                 |
| 12   | Indigo HP W6000 | 0,01780               | 17,50            | 25,00            | 820857,01          | 892557,008            | 1862,51         | 0,0186                 |

Anillo C

|      |                  |                       |                  |                  | Presión T<br>[PSI] | Presión atm.<br>[bar] |                 |                        |
|------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|
|      |                  |                       |                  |                  | 118,90             | 0,717                 |                 |                        |
| Num. | Nombre           | Q corregido<br>[m3/s] | L tubería<br>[m] | Diámetro<br>[mm] | Presión T<br>[Pa]  | Presión abs.<br>[Pa]  | Caída P<br>[Pa] | Caída<br>Presión [bar] |
| 13   | Prensa SX8-103   | 0,00429               | 14,50            | 16,50            | 819777,43          | 891477,431            | 887,16          | 0,0089                 |
| 14   | Prensa CD4-102   | 0,00429               | 15,95            | 16,50            | 819777,43          | 891477,431            | 975,88          | 0,0098                 |
| 15   | Trendsetter      | 0,00918               | 19,45            | 25,00            | 819777,43          | 891477,431            | 608,82          | 0,0061                 |
| 16   | Suprasetter      | 0,00918               | 14,35            | 25,00            | 819777,43          | 891477,431            | 449,18          | 0,0045                 |
| 17   | Ryobi            | 0,00429               | 13,60            | 16,50            | 819777,43          | 891477,431            | 832,10          | 0,0083                 |
| 18   | Plegadoras       | 0,00600               | 11,10            | 16,50            | 819777,43          | 891477,431            | 1263,26         | 0,0126                 |
| 19   | Acabados digital | 0,00600               | 21,70            | 25,00            | 819777,43          | 891477,431            | 309,28          | 0,0031                 |

Nota: En la tabla se detallan los datos que se necesitan para el cálculo de las caídas de presión de las diferentes líneas de servicio y los resultados obtenidos (en los cuadros de color verde).

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 3.2.8.4. Resumen de resultados

Por último a continuación en la tabla 28 se muestra un resumen de resultados en el cual se enlistan los valores del diámetro de tubería, la longitud de la misma y la caída de presión final de toda la red de aire comprimido.

Tabla 32.

Resumen de resultados

| Código | Nombre                 | Diámetro de la tubería comercial [milímetros] | Longitud [metros] | Caída de presión final [bar] |
|--------|------------------------|---|-------------------|------------------------------|
| LP     | Línea principal        | 40,0  | 23,00             | 0,0564                       |
| A-LD   | Anillo A               | 40,0  | 47,00             | 0,0151                       |
| A1-LS  | Acabados               | 16,5  | 4,60              | 0,0115                       |
| A2-LS  | Pasta dura             | 16,5  | 4,60              | 0,0115                       |
| A3-LS  | Serigráfica-trilateral | 25,0  | 21,82             | 0,0071                       |
| A4-LS  | Laminadora             | 16,5  | 18,10             | 0,0146                       |
| A5-LS  | Encoladora             | 16,5  | 7,30              | 0,0122                       |
| A6-LS  | Alzadora               | 25,0  | 7,40              | 0,0042                       |
| A7-LS  | Grapadora              | 25,0  | 24,90             | 0,0052                       |
| B-LD   | Anillo B               | 40,0  | 30,00             | 0,0051                       |
| B1-LS  | Guillotinas            | 25,0  | 14,80             | 0,0036                       |
| B2-LS  | Cartes GT              | 25,0  | 5,52              | 0,0038                       |
| B3-LS  | Indigo HP 5000         | 25,0  | 6,50              | 0,0043                       |
| B4-LS  | Indigo HP 7000         | 25,0  | 5,75              | 0,0041                       |
| B5-LS  | Indigo HP W6000        | 25,0  | 5,80              | 0,0186                       |
| C-LD   | Anillo C               | 40,0  | 48,80             | 0,0159                       |
| C1-LS  | Prensa SX8-103         | 16,5  | 6,40              | 0,0089                       |
| C2-LS  | Prensa CD4-102         | 16,5  | 7,85              | 0,0098                       |
| C3-LS  | Trendsetter            | 25,0  | 9,25              | 0,0061                       |
| C4-LS  | Suprasetter            | 25,0  | 6,65              | 0,0045                       |
| C5-LS  | Ryobi                  | 16,5  | 5,50              | 0,0083                       |
| C6-LS  | Plegadoras             | 16,5  | 5,60              | 0,0126                       |
| C7-LS  | Acabados digital       | 25,0  | 11,50             | 0,0031                       |

Nota: En la tabla se detallan los resultados de los cálculos realizados: diámetros de tubería, longitudes de tubería y caídas de presión, de todas las líneas de la red de abastecimiento de aire comprimido para la nave industrial, estas son las líneas: principal, de distribución y de servicio.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### Capítulo 3:

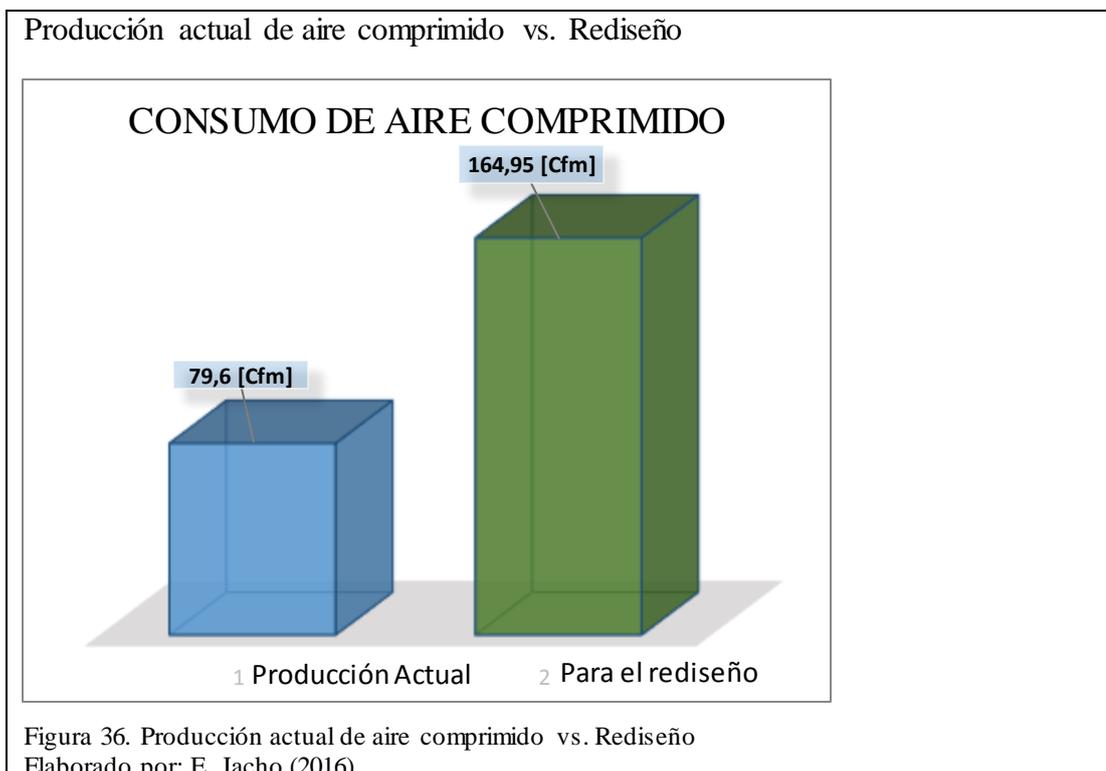
#### Análisis de resultados y cálculo de costos

##### 3.1. Análisis de resultados

##### 3.1.1. Consumo de aire comprimido actual y proyección para el rediseño

De acuerdo con el cálculo realizado en el capítulo anterior, el consumo actual de aire comprimido es de 69,01 [Cfm] sin contar con el consumo ocasionado por las fugas de la red. Y para abastecer a la nave industrial se encuentra operativo el compresor KAESER AS 25, que genera 111 [Cfm], que por efectos de la altura geográfica en la que se encuentra Quito, el caudal disminuye a 79,59 [Cfm], (cálculo detallado en el capítulo anterior). Sin embargo para el rediseño, en el cual se engloba todas las máquinas de la planta de producción que trabajan con aire comprimido y se incluyen las nuevas máquinas adquiridas por la empresa, el cálculo realizado da como resultado un consumo volumétrico de 164,95 [Cfm].

Por tal motivo es inevitable la adquisición de un nuevo compresor, para que se pueda abastecer de aire comprimido a la actual expansión de la empresa y se conserve un porcentaje extra para futuras ampliaciones. Faltando un total de 85,36 [Cfm]. A continuación en la figura 36, se puede observar el incremento de consumo de aire comprimido para el rediseño.



### 3.1.2. Elección del compresor

Se debe adquirir un compresor de 25 [HP], que genere 120 [Cfm] a 125 [Psi] en condiciones normales para que, por la altitud geográfica de Quito, produzca 86 [Cfm] y así pueda cubrir la demanda faltante. Para ello en el anexo 9 se presentan dos opciones de compresores con características similares de diferentes marcas.

Para poder elegir la mejor opción se realizará una comparación económica entre las opciones de los compresores Atlas Copco y Kaeser, a lo largo de tres años, es decir, se toma en cuenta el gasto inicial (el valor de cada compresor) y el gasto que se producirá durante tres años a causa de los mantenimientos preventivos para cada equipo. En las tablas 33 y 34 se presentan los detalles de los costos de cada marca, suponiendo que el compresor trabajará 16 horas diarias, 21 días al mes y los 12 meses del año, resultando un total de horas marcha del compresor en 3 años de 12000 horas.

Tabla 33.

Gasto inicial y plan de mantenimiento preventivo del compresor Kaeser

| TIPO MANT. | HORAS | DESCRIPCION                               | COSTO     |
|------------|-------|---|-----------|
|            |       | COSTO DEL COMPRESOR AS25 T                | 21.513,22 |
| A          | 2000  | FILTRO DE AIRE                            | 124,42    |
| B          | 4000  | KIT DE FILTROS ( AIRE Y ACEITE ) + ACEITE | 416,98    |
| C          | 8000  | B + SEPARADOR DE ACEITE                   | 825,36    |
| D          | 12000 | C + KITS DE VALVULAS                      | 2.433,37  |

Nota: En la tabla se presenta el plan de mantenimiento de hasta 12000 horas para el compresor Kaeser, información obtenida de las cotizaciones realizadas a la empresa Indutorres S.A., anexo 7.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Tabla 34.

Gasto inicial y plan de mantenimiento preventivo del compresor Atlas Copco

| TIPO MANT. | HORAS | DESCRIPCION                               | COSTO     |
|------------|-------|---|-----------|
|            |       | COSTO DEL COMPRESOR GA18 FF               | 19.729,80 |
| A          | 2000  | FILTRO DE AIRE                            | 72,78     |
| B          | 4000  | KIT DE FILTROS ( AIRE Y ACEITE ) + ACEITE | 314,44    |
| C          | 8000  | B + SEPARADOR DE ACEITE                   | 656,90    |
| D          | 12000 | C + KITS DE VALVULAS                      | 1.704,07  |

Nota: En la tabla se presenta el plan de mantenimiento de hasta 12000 horas para el compresor Atlas Copco, información obtenida de la cotización realizada a la empresa Encovele S.A., anexo 7.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Como se puede observar existe una diferencia de valores entre el compresor Kaeser y el Atlas Copco. En la tabla 35 se presentan los valores comparativos.

Tabla 35.  
Comparación de costos entre compresores

|                      | KAESER    | ATLAS COPCO |
|----------------------|-----------|-------------|
| Inversión inicial    | 21.513,22 | 19.729,80   |
| Mantenimiento tipo A | 124,42    | 72,78       |
| Mantenimiento tipo B | 416,98    | 314,44      |
| Mantenimiento tipo C | 825,36    | 656,90      |
| Mantenimiento tipo D | 2.433,37  | 1.704,07    |
| Total                | 25.313,35 | 22.477,99   |

Nota: Información obtenida de las cotizaciones realizadas a las empresas Indutorres S.A. y Emcovele S.A., distribuidoras autorizadas de equipos y repuestos de las respectivas marcas de compresores y que se detallan en el anexo 7.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

A pesar que la diferencia de costos entre el compresor Kaeser y Atlas Copco es de 2835 dólares, siendo la segunda marca, la más económica, hay que tomar en cuenta otros factores que se explican renglones abajo:

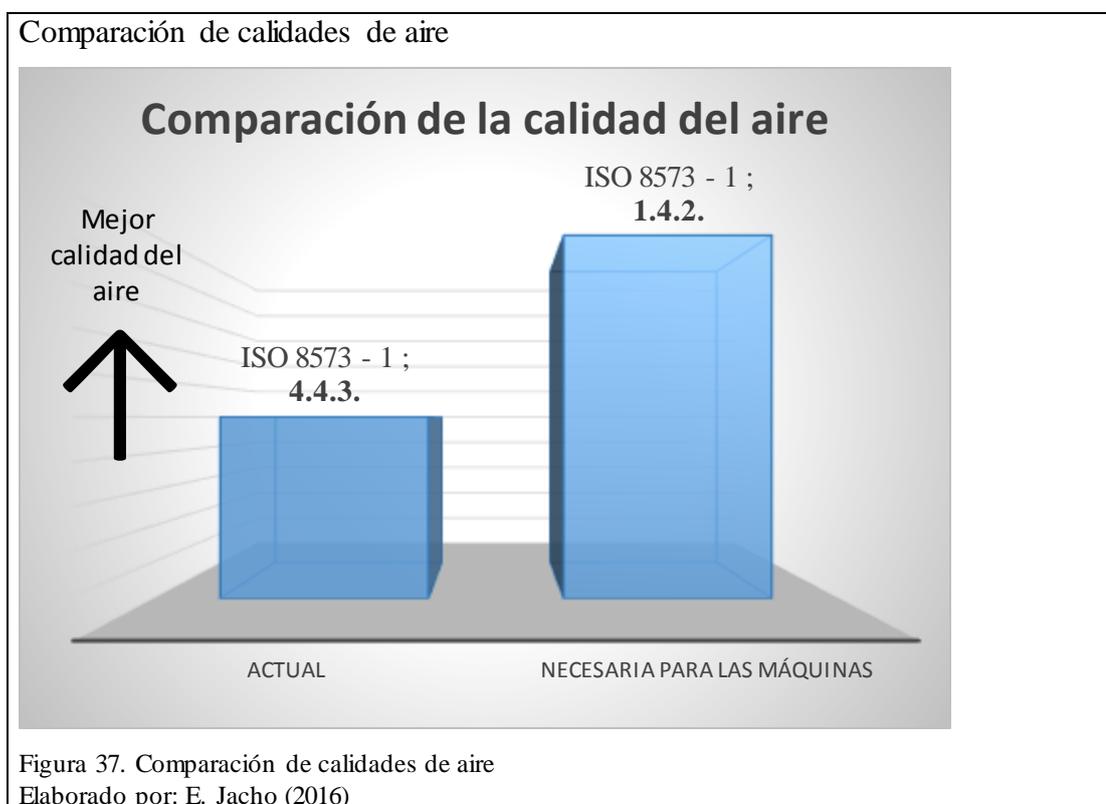
- En relación con compresores de marca Atlas Copco e Ingersoll Rand, el instituto CAGI (Compressed Air & Gas Institute) determina que el compresor Kaeser requiere de menos kW (kilovatios) para generar la misma cantidad de flujo volumétrico que las marcas anteriormente mencionadas (Anexo 9).
- De las dos marcas de compresores, a pesar que la potencia nominal es la misma, el flujo volumétrico generado por el compresor Kaeser es mayor que el otro, generando 120 [Cfm] de caudal de aire comprimido, (anexo 9). Completando el caudal requerido para el rediseño.
- Actualmente la empresa tiene un compresor Kaeser, así que para estandarizar repuestos de la misma marca, el adquirir otro equipo similar, ayudará a llevar un mejor control por parte del área de mantenimiento.

Por tal motivo, se decide elegir al compresor Kaeser, sin embargo, cabe recalcar que la opción del compresor Atlas Copco, es también una excelente elección, por su eficiencia y costos.

### 3.1.3. Calidad del aire

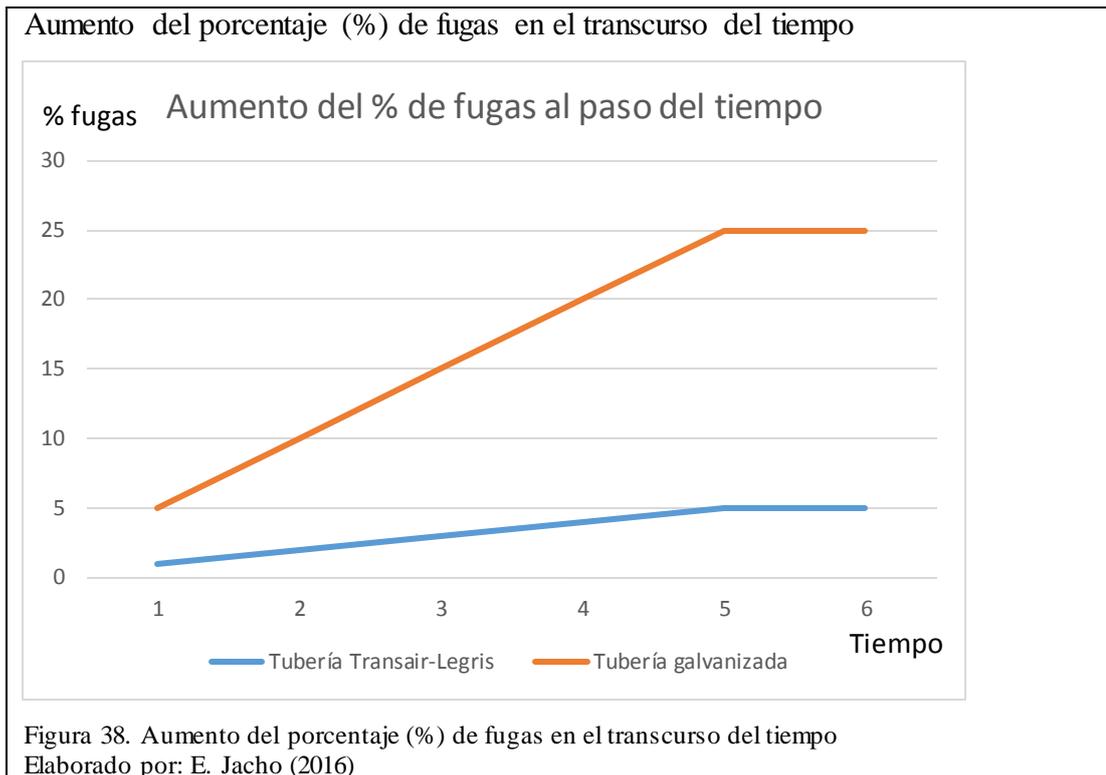
En la figura 37 se muestra la comparación de la calidad del aire de la red actual versus la calidad de aire requerida por los equipos neumáticos y por ende la que se obtendrá en el rediseño.

En la gráfica se visualiza que la calidad de aire actual, ISO 8573-1; 4.4.3, no cumple con las características requeridas que es ISO 8573-1; 1.4.2. En el rediseño se toma en cuenta esta variable, con el correcto dimensionamiento y elección del secador y del filtro de línea.



### 3.1.4. Elección de la tubería para la red de distribución

Mediante la gráfica 38 se representan las razones por las que se seleccionó la tubería Transair-Legrís, para la instalación de la red de aire comprimido en la nave industrial.



Con la tubería transair-legris, el porcentaje de fugas en la red, en el transcurso del tiempo, no superará el 5%, mientras que con otros materiales, el porcentaje después de los 5 años de su instalación puede aumentar hasta el 20% del consumo de aire comprimido de la red. Además, su método de instalación es más rápido en relación a los otros materiales, también por ser aluminio calibrado, se reduce al máximo la caída de presión causada por la rugosidad de la superficie de la tubería, pues el rozamiento será mínimo entre la misma y el flujo másico del aire comprimido, características detalladas en el anexo 4.

En las figura 39, se muestra los defectos que tiene la red de distribución actual que por ser tubería PVC y por haber transcurrido varios años desde su instalación, se ha deformado en tramos donde no tiene apoyos y se han creado derivaciones que aumentan la caída de presión, ya que mientras se use la mayor cantidad de accesorios en una red de aire comprimido, mayor será la caída de presión.

### Defectos de la tubería actual



Figura 39. Defectos de la tubería actual  
Tomada por: E. Jacho (2016)

## 3.2. Cálculo de costos

Los cálculos de costos se han dividido en costos indirectos y directos, que se detallan a continuación.

### 3.2.1. Cálculo de costos indirectos

Son los costos que se generaron por razones indirectas a la ejecución del proyecto, pero que apoyaron a su desarrollo. En la tabla 36 se detallan.

Tabla 36.  
Tabla de costos indirectos

| RECURSO  | VALOR TOTAL USD |
|--|-----------------|
| Material de oficina y suministros              | 150             |
| Instrumentos, equipos y material bibliográfico | 100             |
| Movilización                                   | 120             |
| Varios   | 100             |
| <b>TOTAL DE PRESUPUESTO:</b>                   | <b>470</b>      |

Nota: En la tabla se detallan los recursos indirectos que se utilizaron para la elaboración del proyecto y el valor económico de cada uno.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 3.2.2. Cálculo de costos directos

Para el cálculo de costos directos, los valores económicos o precios fueron adquiridos mediante cotizaciones.

#### 3.2.2.1. Costos de los elementos para la producción del aire comprimido

Para determinar el costo de los elementos para la producción del aire comprimido, en la tabla 37 se detallan los mismos, tomando en cuenta que la marca a ser cotizada es la misma del compresor actual (KAESER) y en la tabla 38 se detallan los precios.

Tabla 37.  
Elementos a ser cotizados

| Elemento                            | Descripción                              | Cantidad |
|-------------------------------------|--|----------|
| Filtro en línea para sistema actual | FILTRO PARA REMOCIÓN DE ACEITE KOR 100   | 1        |
| Compresor                           | COMPRESOR AS25 T SERIE -125 PSI, 120 CFM | 1        |
| Filtro en línea                     | FILTRO PARA REMOCIÓN DE ACEITE KOR 100   | 1        |
| Trampa de condensado                | TRAMPA DE CONDENSADOS AQUAMAT CF19       | 1        |
| Electroválvula para línea principal | AIR MAIN CHARG.SYST DHS40G G11/2 PS63    | 1        |

Nota: En la tabla se detallan los elementos y equipos que necesita el sistema actual de generación y distribución de aire comprimido para cubrir la demanda causada por el crecimiento de la empresa.  
Elaborado por: E. Jacho (2016)

Tabla 38.  
Costo de elementos a ser cotizados

| Item | Descripción                              | Costos   |
|------|--|----------|
| 1    | FILTRO PARA REMOCION DE ACEITE KOR 100   | 774,68   |
| 2    | COMPRESOR AS25 T SERIE -125 PSI, 120 CFM | 21513,23 |
| 3    | FILTRO PARA REMOCION DE ACEITE KOR 100   | 774,68   |
| 4    | TRAMPA DE CONDENSADOS AQUAMAT CF19       | 2251,40  |
| 5    | AIR MAIN CHARG.SYST DHS40G G11/2 PS63    | 4539,67  |
|      | Subtotal                                 | 29853,66 |
|      | IVA 12%                                  | 3582,44  |
|      | Total                                    | 33436,10 |

Nota: En la tabla se detallan los valores económicos de los elementos y equipos que se mostraron en la tabla 37. Tales precios fueron adquiridos de la cotización realizada a la empresa Indutorres S.A., que es la distribuidora autorizada de los compresores Kaeser, (anexo 7).

Elaborado por: E. Jacho (2016)

El costo total para la adquisición de los elementos que se necesitan para la producción del aire comprimido y que cumpla con las características establecidas en el rediseño es de 33.436 dólares con 10 centavos, incluido el IVA (12%).

### 3.2.2.2. Costo de los elementos para la distribución del aire comprimido

Para determinar el costo de los elementos de distribución de aire comprimido, a continuación se detallan los datos que se requieren, tales como: longitudes totales, medidas, cantidades, tipos de los mismos.

Tabla 39.  
Longitud de tubería y accesorios

| Diámetro de tubería [milímetros] | Longitud de tubería [metros] | Accesorios       |       |     |   |             |         |
|----------------------------------|------------------------------|------------------|-------|-----|---|-------------|---------|
|                                  |                              | Válvulas de bola | Codos | T's | Brida de derivación. Instalación rápida | Reducciones | Uniones |
| 40                               | 265                          | 4                | 14    | 23  | 5                                       | 0           | 36      |
| 25                               | 120                          | 11               | 38    | 5   | 0                                       | 19          | 5       |
| 16,5                             | 60                           | 8                | 20    | 1   | 0                                       | 8           | 5       |

Nota: En la tabla se detallan las tres medidas de los diámetros comerciales de la tubería que se necesitará para las instalaciones de la red de aire comprimido, con la longitud de cada una, en metros. También se presentan los tipos de accesorios con sus respectivos diámetros y la cantidad de cada uno. El catálogo de los accesorios y tubería seleccionada se encuentra en el anexo 4.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 3.2.2.2.1. Costos de la red de distribución (tubería)

Para determinar el costo de la red de distribución, se requiere saber los diámetros de la tubería, sus longitudes totales y sus precios, información que en la tabla 40 se detalla:

Tabla 40.  
Detalle del precio de la tubería

| Diámetro de tubería | Longitud de tubería [metros] | Precio  |
|---------------------|------------------------------|---------|
| 40                  | 265                          | 3204,24 |
| 25                  | 120                          | 2071,68 |
| 16,5                | 60                           | 645,84  |

Nota: En la tabla se enlistan los tres diámetros de tubería requeridos para el rediseño, sus longitudes totales y los respectivos precios. Los valores económicos fueron obtenidos de la cotización hecha a Indutorres S.A, anexo 8.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

### 3.2.2.2.2. Costos de los accesorios

En la tabla 41 se detalla el valor del costo por los accesorios:

Tabla 41.  
Precios de los accesorios clasificados por su medida

| Diámetro de tubería | Precio de los accesorios |
|---------------------|--------------------------|
| 40                  | 4444,98                  |
| 25                  | 3125,13                  |
| 16,5                | 1702,86                  |

Nota: En la tabla se detalla en precio de los accesorios clasificados por su medida nominal (diámetro). En total tres diferentes grupos de accesorios. Información que se adquirió de la cotización realizada a Indutorres S.A., presentada en el anexo 8.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

A continuación en la tabla 42 se reúne la información de las tablas 40 y 41, donde se presentan los precios de la tubería y los accesorios, respectivamente y el valor total.

Tabla 42.  
Resumen de valores

| Diámetro de tubería | Precio de los accesorios | Precio de las tuberías | Subtotal |
|---------------------|--------------------------|------------------------|----------|
| 40                  | 4444,98                  | 3204,24                | 7649,22  |
| 25                  | 3125,13                  | 2071,68                | 5196,81  |
| 16,5                | 1702,86                  | 645,84                 | 2348,7   |

|       |          |
|-------|----------|
| Total | 15194,73 |
|-------|----------|

Nota: La tabla está conformada por los precios de los accesorios y las tuberías, divididas en los tres grupos de medidas nominales (diámetros calculados) que se necesitan para el rediseño. E incluye la suma total de estos valores.

Elaborado por: E. Jacho (2016)

Adicional, el proveedor Indutorres S.A., incluye al valor calculado de 15.194 dólares con 73 centavos, un rubro adicional del 10% del mismo que es igual a 1.519 dólares con 47 centavos; dando un total de 16.714 dólares con 20 centavos. Todos estos valores se los pueden encontrar resumidos en la cotización del anexo 8.

### 3.2.2.3. Costo de instalación

Para el cálculo de costos por la instalación de la red de aire comprimido se lo realizó mediante el cálculo del tiempo en que se demorará la obra y se multiplicó por el valor del precio de cada hora. En este caso, los valores se encuentran detallados en la cotización del anexo 8. El valor total por instalación es de 5.036 dólares con 40 centavos.

El costo total para la adquisición e instalación de los elementos para la distribución del aire comprimido y que cumpla con las características establecidas en el rediseño es de 21.750 dólares con 60 centavos.

Por último se determina que el valor total para la realización del proyecto es la suma del costo para la adquisición de los elementos que se necesitan para la producción del aire comprimido (29.853 dólares con 66 centavos no incluido el IVA) y el valor del costo para la adquisición e instalación de los elementos para la distribución del aire comprimido (21.750 dólares con 60 centavos no incluido el IVA), dando un total sin incluir el IVA de: 51.604 dólares con 26 centavos. Cabe recalcar que estos valores se adquirieron de las cotizaciones realizadas a la empresa Indutorres S.A. (distribuidora autorizada del Ecuador de los compresores Kaeser) y que se encuentran en los anexos 7 y 8.

## Conclusiones

- Para el rediseño de la red de aire presurizado fue indispensable determinar parámetros como: la presión de trabajo general de la nave industrial, que es de 8 [bar]; el consumo total de aire comprimido cuando las máquinas generen productos, que es de 165 [Cfm] y la calidad de aire requerida por los elementos neumáticos, que corresponde a la ISO 8573-1; 1.4.2. . Estos tres factores fueron satisfechos en el proyecto.
- Para mantener una presión estable durante toda la red de aire comprimido se intervinieron dos puntos importantes: la configuración de la red, creando tres anillos como líneas de distribución de las cuales partieron las líneas de servicio y que se encuentran unidas por una línea principal; y el material de la tubería que es de aluminio calibrado, el cual, por su método de conexión y sus características, reduce la caída de presión hasta un máximo del 5% del consumo total de aire comprimido.
- Para realizar el estudio de la red actual de aire comprimido y para el rediseño fue indispensable la recopilación de datos y el levantamiento in situ de la ubicación de las máquinas pudiendo concluir lo siguiente: el sistema de producción de aire comprimido (compresor, secador, filtro) actual no abastecerá el continuo crecimiento de la empresa. Por tal motivo en el rediseño se requiere la ampliación del sistema de generación, es decir, la adquisición de: un compresor de 25 [HP] y los elementos de tratamiento del aire, que genere 120 [Cfm] a 125 [Psi] en condiciones normales para que, por la altitud geográfica de Quito, produzca 86 [Cfm]. Que complementará al actual y actuará como back-up en periodos bajos de producción de la empresa.
- Con el análisis del consumo eléctrico se determinó que el compresor trabaja las 24 horas del día, los 7 días de la semana, (con menor frecuencia en periodos de no producción de la empresa), a pesar que no se realicen jornadas nocturnas. Ocasionando que el pago proyectado para cada mes a razón del gasto eléctrico sea de 753 dólares, del cual se puede ahorrar hasta el 49% del mismo, si se realizan acciones correctivas. Este exceso de consumo se produce por las fugas

de aire en la red y en los equipos; además por la falta de control programado para que el equipo generador de aire comprimido se apague en los periodos de no producción.

- Durante el desarrollo de los cálculos se entendió que al dimensionar una red de aire comprimido siempre se tiende a incluir factores de seguridad que a la larga se reflejan en un sobre-dimensionamiento. Pues el caudal calculado de 165 [Cfm] para el rediseño, tiene un factor de seguridad de 2, factor con el cual se cubren los picos más altos de consumo y que por esa razón se justifica tal valor. Ya que si se toma en cuenta que el comportamiento de las máquinas neumáticas de la empresa no se las pueden definir como elementos de consumo continuo, se trató de dimensionar la red lo más eficientemente posible, pues el sobre-dimensionamiento es directamente proporcional al costo de la implementación.
  
- En la vida diaria de un profesional siempre se tendrá la posibilidad, necesidad u obligación de tomar decisiones ya sea para la empresa en la que trabaje o para la suya y es por esta razón que se debe aprender a ser objetivo, crítico, observador, líder y cuyas bases deberán ser conceptos teóricos claros que los sepa interpretar y los conozca a fondo. Sin olvidar que la experiencia profesional es igualmente importante.

## Recomendaciones

- ✓ Se recomienda colocar en la configuración actual para la generación de aire comprimido, un filtro en línea para que retenga las partículas de sólidos y las de aceite, suspendidos en el fluido presurizado que fueron succionados con el aire o que se concentraron y añadieron posterior a la compresión.
- ✓ Se debe tener en cuenta que la causa más grande de caída de presión son filtros saturados y las fugas de aire. Por tal motivo en una línea de distribución bien diseñada es aceptable una caída máxima de presión del 10% de la presión de trabajo. Y para lograrlo se debe tener en cuenta la implementación de un plan de mantenimiento para la red de aire comprimido. Y no incrementar el valor de la regulación de presión para compensar las pérdidas; pues la solución adecuada es revisar las posibles causas del problema.
- ✓ Es recomendable usar tuberías de cobre o acero inoxidable, pero estas dos opciones representan costos muy altos otra alternativa es con la cual se realizó el rediseño; la tubería de aluminio calibrado Legris - Transair. Esta tubería es fácilmente armable y reutilizable porque su desmontaje es sencillo, además por su método de unión eliminan al máximo las fugas.
- ✓ Para poder obtener un ahorro energético y económico, por el consumo de energía eléctrica por parte del compresor, se recomienda la instalación de un control electrónico que apague y encienda el equipo de acuerdo al cronograma establecido en la planta de producción, por la demanda del uso de las máquinas que requieren de aire comprimido. Además para la adquisición del segundo compresor, se recomienda que el mismo, debe tener incorporado en su sistema electrónico de control esta opción de programación, pues hoy en día algunos equipos ya lo tienen.

## Referencias

- Atlas Copco Airpower NV. (2010). *Manual del aire comprimido*. Wilrijk.
- Atlas Copco Venezuela, S.A. (s.f.). *Aire comprimido y sus aplicaciones en la industria*. Caracas.
- C.P.I.F.P. Pirámide. (s.f.). *Eficiencia energética en las instalaciones de aire comprimido*. Huesca.
- Creus, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Barcelona: Marcombo.
- EnergyLab. (s.f.). *Eficiencia energética en sistemas de producción de aire comprimido*. Pontevedra.
- Festo AG & Co. (2002). *Aire comprimido, fuente de energía*. Esslingen.
- Groupe Legris Industries. (s.f.). *Sistema de tubería para aire*. Arizona.
- Kaeser compresores S.L. (s.f.). *Manual de servicio*.
- Kaeser compressors. (2015). *Guía de intalación de sistemas de aire comprimido*. Querétaro.
- Kaeser Kompressoren. (2010). *Técnicas de aire comprimido*. Querétaro-México.
- Majumdar, S. (1998). *Sistemas neumáticos*. México: McGraw-Hill.
- Serrano, A. (2011). *Neumática práctica*. Madrid: Paraninfo.
- SMC Internacional Training;. (2002). *Neumática*. Madrid: Thomson Paraninfo.
- UPME, Colciencias. (s.f.). *Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido*. Bogota.