



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE PARA EL  
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO CENTRALIZADO DE 125 PSI PARA  
ANDEC S.A.”**

**AUTOR: VACA SÁNCHEZ, LUIS MIGUEL  
DIRECTOR: ING. TERNEUS PAEZ, CARLOS FRANCISCO**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "*INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO CENTRALIZADO DE 125 PSI PARA ANDEC S.A.*" fue realizado por el señor *Vaca Sánchez, Luis Miguel* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de enero de 2019

Firma:

Ing. Carlos Francisco Terneus Paez

C. C. 1707217244



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Vaca Sánchez, Luis Miguel* declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“Ingeniería conceptual, básica y de detalle para un sistema de aire comprimido centralizado de 125 psi para ANDEC S.A.”* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Sangolquí, 15 de enero de 2019**

Firma

**Vaca Sánchez Luis Miguel**

C.C.: 1804539441



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **AUTORIZACIÓN**

*Yo, Vaca Sánchez, Luis Miguel autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Ingeniería conceptual, básica y de detalle para un sistema de aire comprimido centralizado de 125 psi para ANDEC S.A.” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

**Sangolquí, 15 de enero de 2019**

Firma

**Vaca Sánchez Luis Miguel**

C.C.: 1804539441

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo para la realización de este proyecto está dedicado a Dios y a mi familia, que son el pilar de mi vida y por quienes la culminación de este proyecto no hubiera sido posible. En especial a mis padres por su apoyo y la confianza depositada en mí.

**Luis Miguel Vaca Sánchez**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la vida, la fortaleza y los recursos que he tenido a disposición para llevar a cabo este proyecto.

A mis padres Luis y Rosa por su cariño, apoyo, paciencia, motivación, valores inculcados y consejos brindados. Por su ejemplo, por enseñarme a siempre actuar con principios y nunca rendirme.

Al Ingeniero Francisco Terneus por su guía, conocimientos y colaboración para el desarrollo del proyecto.

A ANDEC S.A. por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones, mismo que ha permitido mi desarrollo profesional, con mención especial a los Ingenieros Ángel Sánchez, Henry Núñez, Patricio Narváez y al personal de Mantenimiento Mecánico Acería.

**Luis Miguel Vaca Sánche**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>19</b>
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1. Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>24</b>
<b>1.3. Alcance .....</b>	<b>24</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>25</b>
1.4.1. Objetivo general .....	25
1.4.2. Objetivos específicos.....	25
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>26</b>
<b>2. INGENIERÍA CONCEPTUAL.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. Fundamentos de aire comprimido.....</b>	<b>26</b>
2.1.1. Caudal.....	26
2.1.2. Presión .....	27
2.1.3. Humedad.....	27
2.1.3.1. Humedad absoluta.....	27
2.1.3.2. Humedad relativa.....	27
2.1.3.3. Condensado (C) .....	27
2.1.3.4. Separado (S) .....	27
2.1.3.5. Arrastre (C).....	27
2.1.4. Temperatura de punto de rocío .....	28

<b>2.2. Leyes de gases ideales .....</b>	<b>28</b>
2.2.1. Ley de Boyle –Marriote.....	28
2.2.2. Gay Lussac.....	28
2.2.3. Ley general de los gases .....	29
<b>2.3. Sistema de aire comprimido .....</b>	<b>29</b>
2.3.1. Sistema de generación de aire comprimido .....	30
2.3.1.1. Tipos de compresores según el principio de funcionamiento .....	31
2.3.2. Sistema acumulador y depósito de aire comprimido.....	32
2.3.2.1. Volumen del depósito de aire comprimido para cuarto de compresores .....	33
2.3.2.2. Volumen del depósito de aire comprimido cerca de consumidor .....	33
2.3.3. Sistema de secado de aire comprimido.....	34
2.3.3.1. Secado por refrigeración .....	34
2.3.3.2. Secado por adsorción (desecante).....	35
2.3.3.3. Secado por absorción .....	36
2.3.3.4. Régimen de funcionamiento de tipo de secadores.....	36
2.3.4. Acondicionamiento de aire .....	37
2.3.4.1. Calidad de aire comprimido .....	37
2.3.4.2. Filtro de aire comprimido.....	37
2.3.4.3. Unidad de mantenimiento .....	38
2.3.5. Red de distribución de aire comprimido.....	39
2.3.5.1. Según el tipo de circuito de tuberías. ....	39
2.3.5.2. Según el número de estaciones de compresores.....	40
2.3.6. Materiales para la red de aire comprimido .....	42
2.3.7. Instalación correcta de la red .....	43
<b>2.4. Caída de presión en el sistema.....</b>	<b>44</b>
2.4.1. Pérdida admisible en elementos del sistema.....	45
<b>2.5. Dimensionamiento del sistema de aire comprimido .....</b>	<b>46</b>
2.5.1. Efecto de la altitud sobre sistemas de aire comprimido .....	46
2.5.2. Factor de simultaneidad, $F_S$ .....	46
2.5.3. Factor de utilización, $F_U$ .....	46
2.5.4. Factor de fugas y ampliación. ....	47



2.5.5.	Caudal de Aire Libre, $Q_{FAD}$ .....	47
2.5.6.	Caudal real, $Q_R$ .....	47
2.5.7.	Longitud equivalente .....	47
<b>2.6.</b>	<b>Planificación de cuarto de compresores .....</b>	<b>49</b>
<b>2.7.</b>	<b>Regulación de compresores .....</b>	<b>50</b>
2.7.1.	Según la demanda de aire .....	50
2.7.1.1.	Carga base .....	50
2.7.1.2.	Carga punta.....	51
2.7.2.	Según el controlador interno del compresor .....	51
2.7.2.1.	Modo de control simple .....	51
2.7.2.2.	Modo de control Dual .....	51
2.7.2.3.	Modo de control de modulación .....	52
2.7.2.4.	Convertidores de frecuencia .....	52
<b>2.8</b>	<b>Sistema de control de compresores .....</b>	<b>53</b>
2.8.1.	Control en cascada .....	53
2.8.2.	Control por gama de presión .....	53
<b>2.9.</b>	<b>Consumo de energía del compresor .....</b>	<b>54</b>
2.9.1.	Potencia eléctrica consumida .....	54
2.9.2.	Potencia específica .....	54
<b>2.10.</b>	<b>Indicadores de rentabilidad.....</b>	<b>54</b>
2.10.1.	Periodo de recuperación de inversión (PR) .....	54
2.10.2.	Valor actual neto (VAN) .....	55
2.10.3.	Tasa de interna de retorno (TIR) .....	55
2.10.4.	Relación Beneficio-Costo (B/C) .....	56
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>57</b>
<b>3.</b>	<b>INGENIERÍA BÁSICA .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1.</b>	<b>Distribución de aire comprimido e identificación de unidades consumidoras en la Planta.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.</b>	<b>Condiciones ambientales.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.</b>	<b>Demanda de aire comprimido por la Planta de Acería .....</b>	<b>60</b>
3.3.1.1.	Demanda de aire en la Nave de Máquina de Colada Continua .....	61

3.3.1.2. Demanda de aire Nave de Horno Eléctrico y Nave Horno Cuchara .....	63
3.3.1.3. Demanda de aire comprimido de la Planta de Humos .....	67
3.3.1.4. Ejemplo de cálculo de Factor de Simultaneidad y Utilización .....	68
3.3.1.5. Ejemplo de cálculo de caudal real de aire para motor neumático en la Máquina de colada continua MCC.....	68
<b>3.4. Calidad de aire comprimido para los principales consumidores de acuerdo a especificaciones del fabricante.....</b>	<b>69</b>
3.4.1. Casos especiales .....	70
3.4.1.1. Rampa de oxígeno .....	70
3.4.1.2. Limpieza de filtro de mangas .....	70
<b>3.5. Selección del tipo de compresor.....</b>	<b>71</b>
<b>3.6. Selección del tipo de secador .....</b>	<b>71</b>
<b>3.7. Detalle de funcionamiento de cuarto de compresores .....</b>	<b>71</b>
3.7.1. Selección de sistema de control de compresores .....	71
3.7.2. Detalle del funcionamiento del cuarto de compresores.....	71
<b>3.8. Diseño de la red de tubería de aire comprimido .....</b>	<b>74</b>
3.8.1. Selección de configuración de red de aire comprimido. ....	75
3.8.1.1. Según el tipo de circuito.....	75
3.8.1.2. Según el número de estaciones generadoras de aire comprimido .....	75
3.8.2. Selección de material de tubería .....	77
3.8.3. Dimensionamiento de la red de tubería .....	78
3.8.3.1. Ejemplo de cálculo para tubería de $\varnothing$ 4 pulgadas en Anillo MCC .....	78
3.8.3.2. Red de distribución para Nave de Máquina de Colada Continua.....	81
3.8.3.3. Red de distribución para Nave de Horno Eléctrico .....	86
3.8.3.4. Red de distribución hacia Planta de Humos.....	90
3.8.4. Resumen de resultados de dimensionamiento de red de distribución de aire comprimido .....	92
3.8.5. Dimensionamiento de manifold principal .....	93
3.8.5.1. Dimensionamiento de Manifold de Primer Grupo .....	93
3.8.5.2. Dimensionamiento de Manifold de Primer Grupo .....	94
3.8.5.3. Resumen de resultados de dimensionamiento de Manifold .....	96
3.8.6. Dimensionamiento de tanque de almacenamiento de cuarto de compresores .....	96

	10
3.8.7. Selección de filtros .....	97
3.8.8. Selección de drenaje de condensado .....	98
3.8.9. Selección de equipo para tratamiento de condensados.....	98
3.8.10. Disposición de equipos en cuarto de compresores.....	98
3.8.11. Cálculo de caída de presión .....	99
3.8.11.1.Pérdida de presión al punto más lejano de cada área.....	100
<b>3.9. Cálculo de condensado de aire comprimido .....</b>	<b>102</b>
3.9.1. Ejemplo de cálculo de condensado. ....	102
3.9.2. Condensado del sistema.....	108
<b>3.10. Espesor de tubería .....</b>	<b>109</b>
<b>3.11. Dimensionamiento de Bridas para conexión a válvulas .....</b>	<b>111</b>
<b>3.12. Dimensionamiento de válvulas .....</b>	<b>111</b>
<b>3.13. Coeficiente de válvula <math>C_v</math> .....</b>	<b>112</b>
<b>3.14. P&amp;ID del sistema de aire comprimido .....</b>	<b>113</b>
<b>3.15. Layout de la red principal del sistema de aire comprimido .....</b>	<b>113</b>
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>115</b>
<b>4. INGENIERÍA DE DETALLE.....</b>	<b>115</b>
<b>4.1. Lista de equipos y materiales.....</b>	<b>115</b>
<b>4.2. Especificaciones de equipos .....</b>	<b>117</b>
4.2.1. Especificaciones técnicas de Compresores.....	117
4.2.2. Especificaciones técnicas de Secadores .....	117
4.2.3. Especificaciones técnicas de filtros.....	118
4.2.4. Especificaciones de drenajes de condensado.....	119
4.2.5. Especificaciones de unidad de tratamiento de condensado .....	119
4.2.6. Especificaciones técnicas de tanque de aire comprimido.....	119
<b>4.3. Manual de operaciones. ....</b>	<b>121</b>
4.3.1. Sistema de control de compresores .....	121
4.3.2. Sistema de control de direccionamiento de flujo .....	122
<b>4.4. Plan de mantenimiento .....</b>	<b>124</b>
<b>4.5. Planos de detalle y montaje .....</b>	<b>124</b>
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>125</b>

<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b> .....	<b>125</b>
<b>5.1.</b>	<b>Costo de materiales, insumos, instalación e ingeniería.</b> .....	<b>125</b>
<b>5.2.</b>	<b>Coste de energía de sistema actual versus sistema propuesto.</b> .....	<b>125</b>
5.2.1.	Potencia específica consumida por el sistema .....	125
5.2.2.	Coste energético por mes.....	127
<b>5.3.</b>	<b>Beneficio económico</b> .....	<b>128</b>
<b>5.4.</b>	<b>Flujo de caja anual</b> .....	<b>128</b>
<b>5.5.</b>	<b>Cálculo de indicadores de rentabilidad.</b> .....	<b>129</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>130</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>132</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>134</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Compresores de aire en la nave del horno eléctrico, planta de humos y máquina de colada continua en la planta de ANDEC S.A.</i> .....	20
<b>Tabla 2</b> <i>Capacidad total compresores operativos de suministro de aire comprimido de secadores.</i> .....	21
<b>Tabla 3</b> <i>Secadores de aire comprimido de la planta de humos, planta de horno, y máquina de colada continua.</i> .....	22
<b>Tabla 4</b> <i>Cuadro comparativo de secadores.</i> .....	37
<b>Tabla 5</b> <i>Tipos de filtro de aire comprimido.</i> .....	38
<b>Tabla 6</b> <i>Características y prestaciones del material para las tuberías.</i> .....	42
<b>Tabla 7</b> <i>Ventajas y desventajas de materiales utilizados para sistemas de aire comprimido.</i> ...	43
<b>Tabla 8</b> <i>Caída de presión para cada uno de los componentes del cuarto de generación de aire comprimido.</i> .....	45
<b>Tabla 9</b> <i>Recomendación para caída de presión en tuberías fijas.</i> .....	46
<b>Tabla 10</b> <i>Longitud equivalente en metros.</i> .....	48
<b>Tabla 11</b> <i>Condiciones ambientales en la ciudad de Guayaquil del año 2018.</i> .....	60
<b>Tabla 12</b> <i>Caudal máximo simultáneo de aire comprimido por área en la Planta de Acería de ANDEC S.A.</i> .....	60
<b>Tabla 13</b> <i>Demanda de aire comprimido para Máquina de Colada Continua.</i> .....	62
<b>Tabla 14</b> <i>Demanda de aire comprimido para Horno Eléctrico.</i> .....	64
<b>Tabla 15</b> <i>Demanda de aire comprimido para Horno Cuchara.</i> .....	66
<b>Tabla 16</b> <i>Demanda de aire comprimido para Planta de Humos.</i> .....	67
<b>Tabla 17</b> <i>Especificaciones de aire para instrumentación.</i> .....	69
<b>Tabla 18</b> <i>Especificaciones de aire comprimido para servicio general.</i> .....	70
<b>Tabla 19</b> <i>Especificaciones de aire comprimido para la rampa de oxígeno.</i> .....	70
<b>Tabla 20</b> <i>Especificación para aire comprimido para limpieza de filtro de mangas.</i> .....	70
<b>Tabla 21</b> <i>Detalle de compresores que conforman primer grupo.</i> .....	72
<b>Tabla 22</b> <i>Detalle de compresores que conforman segundo grupo.</i> .....	72
<b>Tabla 23</b> <i>Compresores de carga base y carga pico, para Grupo 1 y Grupo 2, para las cuatro combinaciones analizadas.</i> .....	74
<b>Tabla 24</b> <i>Cuadro de selección de tipo de circuito de tubería para Nave de Horno Eléctrico y Nave MCC.</i> .....	75
<b>Tabla 25</b> <i>Cuadro de selección de número de estaciones generadoras de aire comprimido.</i> .....	76
<b>Tabla 26</b> <i>Cuadro de selección de materiales para tubería</i> .....	77
<b>Tabla 27</b> <i>Caída de presión para anillo cerrado de Nave MCC, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.</i> .....	82
<b>Tabla 28</b> <i>Caída de presión para anillo cerrado de Nave MCC, incluyendo un factor de ampliación de 10% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.</i> .....	83

<b>Tabla 29</b>	<i>Caída de presión para anillo abierto de Nave MCC, sin incluir un factor de ampliación y considerando una longitud equivalente aproximada para accesorios..</i>	83
<b>Tabla 30</b>	<i>Caída de presión para anillo abierto de Nave MCC, incluyendo un factor de ampliación de 10% y considerando una longitud equivalente aproximada para accesorios.....</i>	84
<b>Tabla 31</b>	<i>Velocidad de aire comprimido en tubería, para la red de la Nave MCC, para anillo cerrado y anillo abierto. Sin considerar un factor de ampliación. ....</i>	84
<b>Tabla 32</b>	<i>Velocidad de aire comprimido en tubería, para la red de la Nave MCC, para anillo cerrado y anillo abierto. Considerando un factor de ampliación de 10%. ....</i>	85
<b>Tabla 33</b>	<i>Velocidad de aire comprimido en tubería, para tramo desde cuarto de compresores hasta el anillo de la Nave MCC, considerando y no un factor de ampliación de 10%.85</i>	
<b>Tabla 34</b>	<i>Caída de presión para anillo cerrado de Nave Horno, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios .....</i>	87
<b>Tabla 35</b>	<i>Caída de presión para anillo cerrado de Nave Horno, incluyendo factor de ampliación de 20% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.....</i>	87
<b>Tabla 36</b>	<i>Caída de presión para anillo abierto de Nave Horno, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios. ....</i>	88
<b>Tabla 37</b>	<i>Caída de presión para anillo abierto de Nave Horno, incluyendo factor de ampliación de 20% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.....</i>	88
<b>Tabla 38</b>	<i>Velocidad de aire comprimido en anillo de Nave de Horno sin utilizar factor de ampliación.....</i>	89
<b>Tabla 39</b>	<i>Velocidad de aire comprimido en anillo de Nave de Horno utilizando un factor de ampliación de 20%. ....</i>	89
<b>Tabla 40</b>	<i>Velocidad de aire comprimido para tramo desde cuarto de compresores hasta anillo de Nave de Horno considerando y no un factor de ampliación de 20%. ....</i>	90
<b>Tabla 41</b>	<i>Caída de presión para red de Planta de Humos, sin considerar un factor de ampliación.....</i>	91
<b>Tabla 42</b>	<i>Caída de presión para red de Planta de Humos, considerando un factor de ampliación.....</i>	91
<b>Tabla 43</b>	<i>Velocidad de aire comprimido para Red de Planta de Humos, considerando y no un factor de ampliación de 10%.....</i>	92
<b>Tabla 44</b>	<i>Resumen de diámetros seleccionados para red de distribución de aire comprimido.</i>	93
<b>Tabla 45</b>	<i>Velocidad de aire comprimido para Manifold 1, para diferentes diámetros. ....</i>	94
<b>Tabla 46</b>	<i>Caída de presión para Manifold 1. ....</i>	94
<b>Tabla 47</b>	<i>Velocidad de aire comprimido para varios diámetros Manifold 2.....</i>	95
<b>Tabla 48</b>	<i>Caída de presión para diferentes diámetros de Manifold 2.....</i>	95
<b>Tabla 49</b>	<i>Diámetro de Manifold para Grupo 1 y Grupo 2 de compresores. ....</i>	96
<b>Tabla 50</b>	<i>Resumen de resultados de dimensionamiento de tanque de aire comprimido para las cuatro configuraciones planificadas para el funcionamiento del sistema. ....</i>	97

<b>Tabla 51</b>	<i>Factor de corrección de filtros de acuerdo a la presión de operación.</i>	97
<b>Tabla 52</b>	<i>Drenaje de condensado seleccionado para cada elemento del sistema.</i>	98
<b>Tabla 53</b>	<i>Secador, Filtro KFS y Filtro KOR correspondiente a cada compresor del sistema.</i>	99
<b>Tabla 54</b>	<i>Caída de presión para cada uno de los componentes del cuarto de generación de aire comprimido.</i>	99
<b>Tabla 55</b>	<i>Caída de presión de Manifold y tubería de descarga en cuarto de compresores.</i>	100
<b>Tabla 56</b>	<i>Caída de presión en red principal del sistema.</i>	100
<b>Tabla 57</b>	<i>Pérdida de presión al punto más lejano de cada área.</i>	101
<b>Tabla 58</b>	<i>Caudal de condensado inicial y caudal de condensado separados.</i>	108
<b>Tabla 59</b>	<i>Contenido de condensado y separados por Kg de aire para los Grupos Compresor-Refrigerador-Separador-Secador-Tanque.</i>	109
<b>Tabla 60</b>	<i>Espesores mínimos calculados de acuerdo a la presión y temperatura de servicio del sistema; y espesores de cédula 40 para acero negro.</i>	110
<b>Tabla 61</b>	<i>Espesores mínimos calculados para válvulas a la presión y temperatura de servicio del sistema, para Clase 150.</i>	112
<b>Tabla 62</b>	<i>Coefficiente de válvula para los elementos del sistema.</i>	113
<b>Tabla 63</b>	<i>Lista de materiales para sistema de aire comprimido de Planta de Acería de ANDEC S.A.</i>	115
<b>Tabla 64</b>	<i>Especificaciones técnicas de compresores.</i>	117
<b>Tabla 65</b>	<i>Especificaciones técnicas de secadores.</i>	117
<b>Tabla 66</b>	<i>Especificaciones generales de filtros de aire comprimido KOR y KFS.</i>	118
<b>Tabla 67</b>	<i>Especificaciones técnicas de filtros de aire comprimido.</i>	118
<b>Tabla 68</b>	<i>Especificaciones de drenaje de condensado.</i>	119
<b>Tabla 69</b>	<i>Especificaciones de Unidad de tratamiento de condensados.</i>	119
<b>Tabla 70</b>	<i>Especificaciones de Tanque de aire comprimido.</i>	120
<b>Tabla 71</b>	<i>Compresores de carga base y carga pico, para Grupo 1 y Grupo 2, para las cuatro combinaciones analizadas.</i>	121
<b>Tabla 72</b>	<i>Parámetros de configuración de presión para compresores.</i>	122
<b>Tabla 73</b>	<i>Sistema de válvulas de direccionamiento de flujo.</i>	123
<b>Tabla 74</b>	<i>Programa de mantenimiento de compresores.</i>	124
<b>Tabla 75</b>	<i>Mantenimiento de secador.</i>	124
<b>Tabla 76</b>	<i>Resumen de costos de proyecto en materiales, suministros, instalación e ingeniería.</i>	125
<b>Tabla 77</b>	<i>Potencia específica consumida por compresores en el sistema de aire comprimido actual</i>	126
<b>Tabla 78</b>	<i>Potencia específica consumida por compresores en el sistema de aire comprimido propuesto.</i>	126
<b>Tabla 79</b>	<i>Costo energético mensual de sistema de aire comprimido actual.</i>	127
<b>Tabla 80</b>	<i>Costo energético mensual de sistema de aire comprimido propuesto.</i>	127
<b>Tabla 81</b>	<i>Beneficio económico mensual al comparar sistema actual con sistema propuesto.</i>	128
<b>Tabla 82</b>	<i>Flujo de anual y flujo anual acumulado.</i>	128
<b>Tabla 83</b>	<i>Valor actual neto, Tasa interna de retorno y relación Costo/Beneficio.</i>	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esquema de la ubicación de sistemas de generación y acondicionamiento de aire comprimido para la Planta de Humos, Nave de Horno, y Máquina de Colada Continua.....	23
<b>Figura 2</b> Propiedades esenciales de aire comprimido.....	26
<b>Figura 3</b> Flujograma de un sistema de generación, acondicionamiento y conducción de aire comprimido. ....	29
<b>Figura 4</b> Disposición de los elementos del cuarto de compresores del sistema de aire comprimido.. ....	30
<b>Figura 5</b> Clasificación de compresores según el principio de funcionamiento. ....	31
<b>Figura 6</b> Régimen de funcionamiento de compresores por caudal y presión.. ....	32
<b>Figura 7</b> Secador por refrigeración. 1) Salida de aire. 2) Ingreso de aire. 3) Intercambiador de calor aire/aire. 4) Separador. 5) Máquina de frío. 6) Separador. 7) Refrigerante. 8) Máquina frigorífica.....	35
<b>Figura 8</b> 1) Válvula de cierre. 2) Filtro de aceite. 3) Válvula de cierre 4) Calefacción 5) Ventilador. 6) Aire seco. 7) Segundo filtro. 8) Válvula de cierre (cerrada). 9) Válvula de cierre (abierto). 10) Aire caliente. 11) Unidad 2 de adsorción. 12) Unidad 1 de adsorción. 13) Válvula de cierre (abierto).....	35
<b>Figura 9</b> 1) Salida de aire seco; 2) Agente de fundición; 3) Condensado; 4) Descarga del condensado; 5) Entrada de aire húmedo. ....	36
<b>Figura 10</b> Intervalo de secado de diferentes sistemas .....	36
<b>Figura 11</b> Sistema de tuberías abierto. ....	39
<b>Figura 12</b> Sistema de tuberías cerrado.....	40
<b>Figura 13</b> Suministro con una sola estación. ....	41
<b>Figura 14</b> Suministro con varias estaciones.....	41
<b>Figura 15</b> Conexión cuello de cisne para bajante.....	44
<b>Figura 16</b> Manifold y dren de condensados para cuarto de compresores. 1) Manifold principal, 2) Cuello de cisne, 3) Conexión de compresor, 4) Trampas para condensado de Manifold principal, 5) Hacia la red de aire comprimido, 6) Dren de condensado. 7) Manifold de condensado.....	50
<b>Figura 17</b> Banda de presión Min - Max dentro de la cual funciona el compresor .....	51
<b>Figura 18</b> Modo de control Dual. ....	52
<b>Figura 19</b> Control de modulación.....	52
<b>Figura 20</b> Regulación continua del caudal a través de la velocidad de giro de motor .....	53
<b>Figura 21</b> Control de compresores por cascada. ....	53
<b>Figura 22</b> Principales consumidores de aire comprimido de para la Planta Acería de Andec S.A. ....	57
<b>Figura 23</b> Distribución de aire comprimido en Planta de Humos.....	58
<b>Figura 24</b> Distribución de aire comprimido en Horno Cuchara.....	59
<b>Figura 25</b> Caudal máximo simultáneo para planta de Acería ANDEC S.A. ....	61
<b>Figura 26</b> Caudal máximo simultáneo requerido en la Máquina de Colada Continua.....	63



<b>Figura 27</b> Caudal máximo simultáneo requerido para Horno Eléctrico.....	65
<b>Figura 28</b> Caudal máximo simultáneo requerido para Horno Cuchara.....	66
<b>Figura 29</b> Caudal máximo simultáneo requerido para Planta de Humos. ....	67
<b>Figura 30</b> Diagrama de cuarto de compresores del sistema, compuesto de dos grupos de cuatro compresores, dos tanques de almacenamiento y un sistema de válvulas que permite direccionar el flujo a las tres áreas consumidoras de acuerdo a la necesidad.	73
<b>Figura 31</b> Disposición de los equipos en el sistema de cuarto de compresores y consideraciones iniciales para el cálculo de condensado.....	103
<b>Figura 32</b> Layout del sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A..	114
<b>Figura 33</b> Sistema de válvulas de direccionamiento de flujo. ....	122
<b>Figura 34</b> Tiempo de recuperación de inversión. ....	129

## **RESUMEN**

El presente proyecto consiste en el desarrollo de la Ingeniería Conceptual, Básica y de Detalle de un sistema de aire comprimido centralizado para la Planta de Acería de ANDEC S.A., misma que comprende la Planta de Humos, Nave de Horno Eléctrico y Nave de la Máquina de Colada Continua (MCC). La Ingeniería conceptual detalla los fundamentos científicos y tecnológicos para el desarrollo de una red de aire comprimido enfocado a la optimización del consumo energético, el aprovechamiento máximo de la capacidad instalada y la posibilidad de realizar trabajos de mantenimiento planificado sin cortes de producción. La Ingeniería Básica contiene un estudio técnico del caudal, presión y calidad de aire, considerando factores de utilización y simultaneidad. Se realiza la selección y dimensionamiento del equipo de generación, tratamiento, almacenamiento y distribución de aire comprimido, además se especifica el sistema de control de compresores y se detalla el principio de funcionamiento del sistema. Se selecciona la configuración y disposición de los equipos en el sistema, se elabora un layout y un P&ID del sistema, se determina la eficiencia del sistema analizando la caída de presión desde el cuarto de compresores a la unidad consumidora más lejana de cada área. La Ingeniería de detalle incluye una lista de materiales y equipos, las especificaciones para los equipos de generación, tratamiento y almacenamiento de aire comprimido, un manual de operaciones y mantenimiento, planos de detalle y montaje. Además se realiza un estudio del consumo energético del sistema y se elabora un análisis económico.

**PALABRAS CLAVE: AIRE COMPRIMIDO, OPTIMIZACIÓN, EFICIENCIA.**

## **ABSTRACT**

The present project consists in the development of the Conceptual, Basic and Detailed Engineering of a centralized compressed air system for the Steel Plant of ANDEC S.A., which includes the Fume Treatment Plant, Electric Arc Furnace and Continuous Casting Machine Area. The Conceptual engineering details the scientific and technological foundations for the development of a centralized compressed air network focused on the optimization of energy consumption, the maximum use of installed capacity and the possibility of carrying out planned maintenance work without stopping production. The Basic Engineering includes a technical study of the flow, pressure and air quality required by each of the consuming units, considering utilization and simultaneity factors. The equipment for the generation, treatment, storage and distribution of compressed air is selected and dimensioned, and the compressor control system is specified, and the operation of the system is detailed. The configuration and disposition of the equipment in the system is selected, a P&ID of the system and layout is elaborated, the efficiency of the system is determined by analyzing the pressure drop from the compressor room to the farthest consuming unit of each area. Detailed engineering includes a list of materials and equipment, specifications for compressed air generation, treatment and storage equipment, a manual of operations and maintenance, plans of detail and assembly.

**KEYWORDS: COMPRESSED AIR, OPTIMIZATION, EFFICIENCY.**

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Antecedentes

En la planta industrial de ANDEC S.A., ubicada al sur de la ciudad de Guayaquil, se funde, afina y laminan varillas corrugadas soldables en acero al carbono, alambρόn grafilado y trefilado, mallas electro-soldadas, armaduras conformadas y barras cuadradas. En sí la planta de producción de ANDEC S.A. está dividida en dos áreas, Acería y Laminación, este proyecto involucra solamente al área de Acería.

El aire comprimido es utilizado en las industrias porque es más rápido en comparación con los sistemas hidráulicos, sin embargo, es menos preciso y no permite fuerzas grandes. (Solé, 2011).

En la planta de acería de ANDEC S.A. el aire comprimido es principalmente utilizado para generar el movimiento de actuadores neumáticos, pulverizar diésel, transporte de cal y carbón, entre otras aplicaciones.

El área de acería de ANDEC S.A. incluye la Planta de Humos, Nave de Horno Eléctrico y Nave de Máquina de Colada Continua, en un principio cada área contaba con un sistema independiente de generación, acondicionamiento y distribución de aire comprimido, sin embargo, debido a las averías ocasionadas en los compresores que suministran aire comprimido a la Nave del Horno Eléctrico, se realizaron conexiones improvisadas con el propósito de cubrir la demanda requerida, de esta manera se transformó tres sistemas independientes en un sistema interconectado con tres estaciones generadoras de aire comprimido dispersas por la Planta de Acería, esto se realizó sin un estudio previo detallado que considere la optimización del grado de utilización de la capacidad instalada, consumo energético y costos de mantenimiento.

La Tabla 1 muestra los equipos generadores de aire comprimido que tiene a disposición la Planta de Acería de ANDEC S.A, esta detalla las especificaciones técnicas como modelo, capacidad, potencia, ubicación, presión máxima y año en el que inició su operación. La Planta de Acería de ANDEC S.A. cuenta con 8 compresores de tornillo, 3 de los cuales se encuentran en la Nave del Horno Eléctrico, 2 en la Planta de Humos y 3 son utilizados en la Nave de la Máquina de Colada Continua (MCC).

**Tabla 1**

*Compresores de aire en la nave del horno eléctrico, planta de humos y máquina de colada continua en la planta de ANDEC S.A.*

Marca	Modelo	Caudal	Potencia (HP)	Ubicación	Presión máx.	Año de inicio de operación	Estado
Kaeser	SFC 37	242 cfm (411 $\frac{m^3}{h}$ )	50	Nave Horno Eléctrico	125 psi (8,79 bar)	2007	En servicio
Kaeser	SFC 110 ST	692 cfm (1175 $\frac{m^3}{h}$ )	148	Planta de Humos	125 psi (8,79 bar)	2009	En servicio
Betico	ER 110	300 cfm (510 $\frac{m^3}{h}$ )	148	Planta de humos	125 psi (8,79 bar)	2009	Back up
Atlas Copco	GA90V SD	564 cfm (958 $\frac{m^3}{h}$ )	125	Nave Horno Eléctrico	125 psi (8,79 bar)	2006	Fuera de servicio
Kaeser	CSD 125T	566 cfm (962 $\frac{m^3}{h}$ )	125	Nave Horno Eléctrico	125 psi (8,79 bar)	2012	Fuera de servicio
Kaeser	CSD 125	567 cfm (963 $\frac{m^3}{h}$ )	125	Nave MCC	125 psi (8,79 bar)	2013	En servicio
Kaeser	CSD 75	345 cfm (586 $\frac{m^3}{h}$ )	75	Nave MCC	125 psi (8,79 bar)	2013	En servicio
Kaeser	CSD 75	345 cfm (586 $\frac{m^3}{h}$ )	75	Nave MCC	125 psi (8,79 bar)	2013	En servicio

Fuente: ANDEC S.A.

La Tabla 2 muestra la capacidad de caudal total que suministran los compresores que se encuentran en servicio, cabe recalcar que, en el transcurso de 2018, la planta solo produce durante un turno y no las 24 horas como lo venía haciendo en años anteriores. Al momento los compresores Betico ER 110 de la Planta de Humos, Atlas Copco GA90VSD y Kaeser CSD125T de la Nave de Horno Eléctrico se encuentran en mantenimiento correctivo y se espera que estén disponibles para el año 2019.

**Tabla 2**  
*Capacidad total compresores operativos de suministro de aire comprimido de secadores.*

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad</b>
Kaeser	SFC 37	242 cfm (411 m <sup>3</sup> /h)
Kaeser	SFC110 ST	692 cfm (1175 m <sup>3</sup> /h)
Kaeser	CSD125	567 cfm (963 m <sup>3</sup> /h)
Kaeser	CSD 75	345 cfm (586 m <sup>3</sup> /h)
Kaeser	CSD 75	345 cfm (586 m <sup>3</sup> /h)
<b>CAPACIDAD TOTAL</b>		2191 cfm (3721 m <sup>3</sup> /h)

Fuente: ANDEC S.A.

Los secadores que tiene a disposición la Planta de Acería para sus tres áreas de producción se detallan en la Tabla 3, cabe recalcar que algunos compresores ya incluyen un secador.

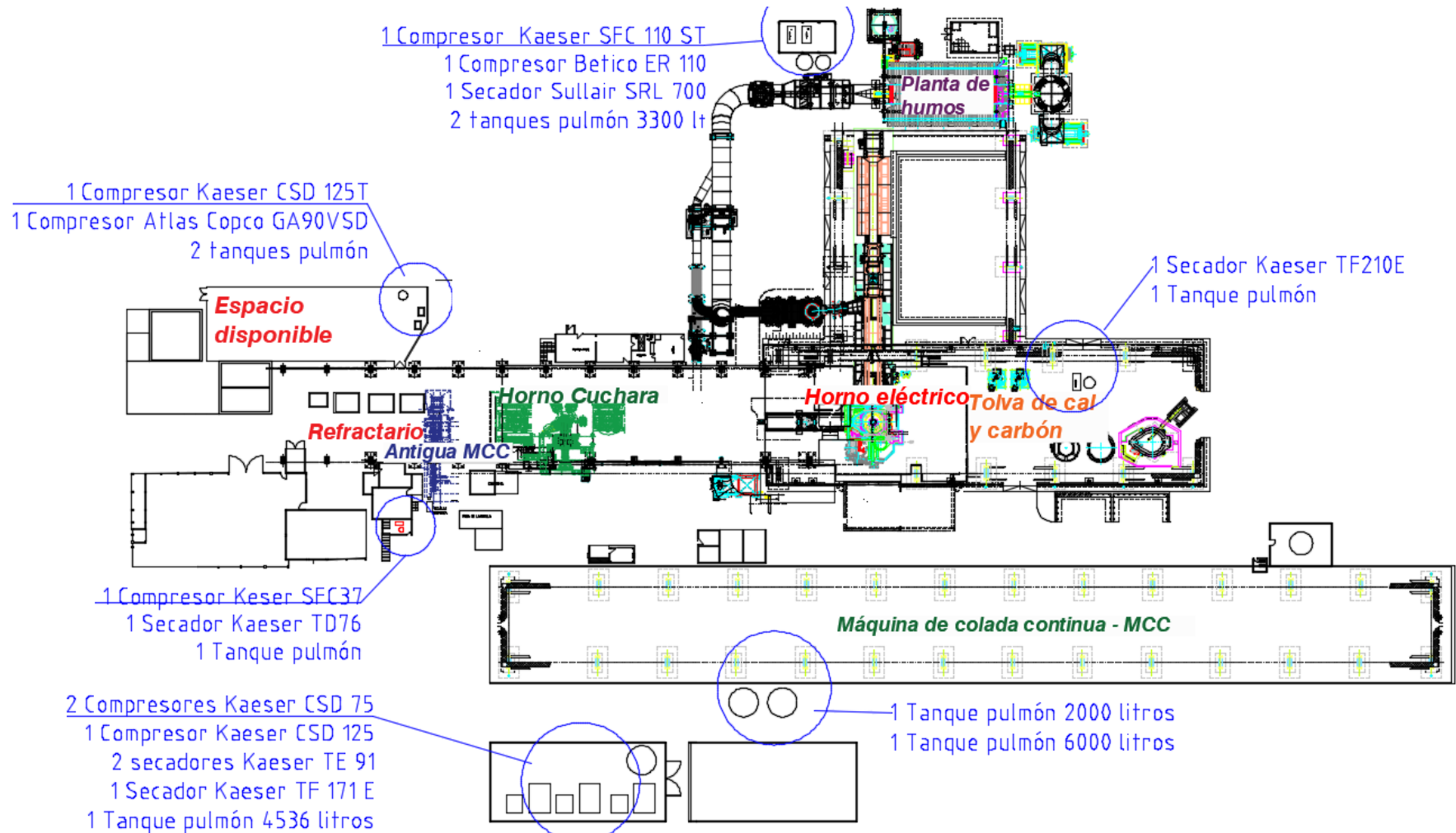
**Tabla 3**

*Secadores de aire comprimido de la planta de humos, planta de horno, y máquina de colada continua.*

Cant.	Marca	Modelo	Ubicación	Año de inicio de operación	Estado	Tipo de secador
1	Kaeser	TD76	Nave de Horno eléctrico	2011	En servicio	Refrigeración
1	Kaeser	TF210E	Nave de Horno eléctrico	2010	En servicio	Refrigeración
1	Kaeser	TF171E	Nave MCC	2013	En servicio	Refrigeración
2	Kaeser	TE91	Nave MCC	2013	En servicio	Refrigeración
1	Sullair	SRL 700	Planta de humos	2009	Fuera de operación	Refrigeración

Fuente: ANDEC S.A.

En la Figura 1 se observa la ubicación de los compresores, secadores y taques pulmón para la Planta de humos, la nave de horno eléctrico y la máquina de colada continua, por otro lado, la planta cuenta con secadores de aire comprimido mismos que son indispensables para controlar que la humedad no exceda el límite admisible para que los procesos se lleven a cabo cumpliendo parámetros óptimos.



**Figura 1** Esquema de la ubicación de sistemas de generación y acondicionamiento de aire comprimido para la Planta de Humos, Nave de Horno, y Máquina de Colada Continua.



## **1.2. Justificación**

La Planta de Humos, la Nave del Horno Eléctrico y la Nave de la Máquina de Colada Continua de la Planta de Acería de ANDEC en la actualidad cuentan con suministro de aire comprimido, sin embargo, las líneas actuales de aire comprimido no están pensadas para fines de crecimiento ni para optimizar el consumo energético, además, en el transcurso de los años se han realizado varias conexiones sin un estudio correspondiente. Actualmente no se utiliza la capacidad instalada de manera adecuada, de los ocho compresores disponibles en la Planta de Acería solo se utilizan cinco, los compresores Atlas Copco GA90VSD y CSD125T ubicados en la Nave del Horno Eléctrico, al igual que el Betico ER110 ubicado en la Planta de Humos son muy poco o nada utilizados.

ANDEC S.A. requiere un sistema centralizado de aire comprimido para satisfacer la demanda de la Nave de Máquina de Colada Continua, Nave de Horno Eléctrico y Planta de Humos, con una optimización en el consumo energético, una configuración del sistema adecuado que posibilite el aprovechamiento máximo de la capacidad instalada, y permita un mantenimiento planificado en el que no exista la necesidad de detener la producción.

## **1.3. Alcance**

Dentro de la ingeniería conceptual se realizará una investigación bibliográfica que detalle los fundamentos científicos y tecnológicos de un sistema centralizado de aire comprimido. En la ingeniería básica se realiza un estudio técnico de la calidad y la demanda total actual de aire comprimido requerida por las unidades consumidoras de la Planta de Humos, Nave de Horno Eléctrico y Máquina de Colada Continua de la Planta de Acería de ANDEC S.A., se elabora un listado de los equipos y elementos de la red de aire comprimido, se realiza un análisis de

especificaciones técnicas de equipos, se selecciona la configuración de la red de distribución de aire comprimido tomando en cuenta futuras ampliaciones (disposición de equipos), se realiza memorias de cálculo para dimensionar la red de aire comprimido, además se desarrolla un P&ID. En la ingeniería de detalle se realiza la elaboración de un dossier que permita una posterior implementación incluyendo la elaboración de planos de instalación, memorias de cálculo detalladas, elaboración de procedimientos para el mantenimiento y operación de la red de aire comprimido, análisis económico de costos de operación e inversión.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar la ingeniería conceptual, básica y de detalle para el sistema de aire comprimido centralizado de 125 psi para ANDEC S.A.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica de los fundamentos científicos y tecnológicos para el diseño de redes de aire comprimido.
- Determinar la demanda y calidad de aire comprimido para la Planta de Humos, Nave de Horno Cuchara y Máquina de Colada Continua en la Planta de Producción de ANDEC S.A. considerando futuras ampliaciones.
- Establecer alternativas de configuración de redes de aire comprimido considerando costo – beneficio.
- Desarrollar procedimientos de utilización y mantenimiento del sistema de aire comprimido.
- Generar planos de instalación y memorias de cálculo.

## CAPÍTULO II

### 2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

#### 2.1. Fundamentos de aire comprimido

Según Serrano (2009), el aire comprimido posee tres características esenciales, estas son la fluidez, compresibilidad y elasticidad, ver Figura 2. La fluidez permite que el aire no ofrezca resistencia al transportarse, la compresibilidad permite a una cantidad de aire pueda reducir su volumen y la elasticidad permite al aire comprimido ejercer fuerza sobre la superficie interna del recipiente que lo contiene.



**Figura 2** Propiedades esenciales de aire comprimido.

Fuente: (Serrano, 2009)

##### 2.1.1. Caudal

Según Berrío & Ochoa (2007), el caudal es el volumen de aire comprimido que fluye a través de una sección por unidad de tiempo, en este documento se utilizará dos unidades para expresar caudal, metros cúbicos por ( $m^3/h$ ) y pies cúbicos por minuto (cfm).

Si el caudal es excesivo para la dimensión de la unidad consumidora, las pérdidas de presión pueden ser altas, por otro lado, si el caudal no es suficiente la unidad consumidora estará sobredimensionada. (Serrano, 2009).

El caudal volumétrico  $Q$  se puede determinar como el producto de la sección transversal  $A$  y la velocidad media del fluido  $V_{prom}$ , como indica (Atlas Copco, 2011).

$$Q = A \cdot V_{prom}$$

### **2.1.2. Presión**

De acuerdo Berrío & Ochoa (2007), la presión que ejerce el aire comprimido sobre una superficie es el cociente de la fuerza ejercida para el área. En este documento las unidades que se van a utilizar son bares (bar) y libras sobre pulgada cuadrada (psi).

### **2.1.3. Humedad**

#### **2.1.3.1. Humedad absoluta**

Es el contenido real de vapor de agua en un metro cúbico de aire. (Ebel, 2009).

#### **2.1.3.2. Humedad relativa**

La humedad relativa es la relación de la humedad contenida en el aire respecto a la cantidad máxima de humedad que puede contener el aire a esa temperatura. (Cengel & Boles , 2012).

La temperatura del aire y condiciones climatológicas influyen en la humedad relativa, misma que se puede calcular con la siguiente fórmula. (Ebel, 2009).

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{Humedad absoluta}}{\text{Cantidad de saturación}} \times 100\%$$

#### **2.1.3.3. Condensado (C)**

Es la fase líquida producida en un proceso específico, en el sistema de aire comprimido se obtiene condensado por enfriamiento en el refrigerador y el secador frigorífico.

#### **2.1.3.4. Separado (S)**

Es la porción de fase líquida que es eliminada al exterior del sistema.

#### **2.1.3.5. Arrastre (C)**

Es la fracción de fase líquida que no es separada al exterior y es transportada junto al aire comprimido en el sistema.

### **2.1.4. Temperatura de punto de rocío**

La temperatura de punto de rocío es aquella en la que el aire empieza a condensarse si el aire comprimido se enfría a presión constante. El contenido de humedad en el aire se condensa al permanecer en contacto con una superficie fría. A esta temperatura la humedad relativa alcanza el 100%. (Cengel & Boles , 2012).

## **2.2. Leyes de gases ideales**

De acuerdo con Serrano (2009), las leyes de los gases pueden ser utilizadas para ciertas aplicaciones, estas relacionan presión, temperatura y volumen.

### **2.2.1. Ley de Boyle –Marriote**

Asumiendo una temperatura constante, el volumen de aire comprimido contenido en un recipiente de aire comprimido es inversamente proporcional a la presión absoluta, esta ley se expresa por medio de la siguiente ecuación (Ebel, 2009):

$$P_1V_1 = P_2V_2 = P_3V_3 = cte$$

Esta ley puede ser utilizada para estudiar el funcionamiento de actuadores neumáticos. (Ebel, 2009).

### **2.2.2. Gay Lussac**

Si la presión se mantiene sin cambio, el volumen de un gas perfecto almacenado en un recipiente hermético es directamente proporcional a la temperatura absoluta, esto queda expresado de la siguiente manera (Ebel, 2009):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

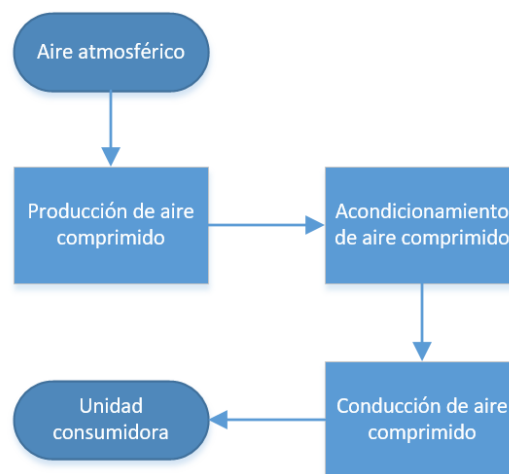
### 2.2.3. Ley general de los gases

La presión  $P$ , volumen específico  $V_{esp}$  y temperatura  $T$  poseen una relación proporcional entre sí, como muestra la siguiente ecuación. (Hesse, 2002).

$$\frac{P \cdot V_{esp}}{T} = cte.$$

## 2.3. Sistema de aire comprimido

De acuerdo a Guillén (2009), en un sistema de aire comprimido el fluido es sometido a un proceso de tres etapas, producción, acondicionamiento y conducción, ver Figura 3.



**Figura 3** Flujograma de un sistema de generación, acondicionamiento y conducción de aire comprimido.

*Fuente: (Guillén, 2009).*

Según Serrano (2009), existen varias ventajas del aire comprimido respecto a la oleo hidráulica.

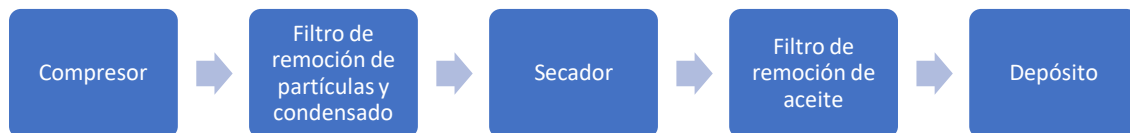
Entre ellas tenemos:

- Los elementos que componen la red son más económicos.
- La instalación es simple y versátil.
- La energía neumática puede ser transportado y almacenado en recipientes herméticos.
- La red de aire comprimido no presenta ningún peligro de incendio.

Serrano (2009) menciona algunos inconvenientes de la red de aire comprimido:

- Tiene una fuerza limitada, 30000N, la oleo hidráulica en comparación no tiene límite.
- El costo de la energía es mayor en comparación a la oleo hidráulica.
- El fluido no es reutilizable.

De acuerdo a Ebel (2009), el aire comprimido necesita cumplir ciertas especificaciones de acuerdo a la aplicación, el aire comprimido debe mantenerse a una presión correcta, debe estar limpio y poseer un contenido de humedad mínimo. En la Figura 4 se muestra los elementos del sistema que se necesitan para producir, acondicionar y conducir aire comprimido.



**Figura 4** Disposición de los elementos del cuarto de compresores del sistema de aire comprimido.

Fuente: (Beals, Ghislain, Kemp, & McCulloch, 2003).

### 2.3.1. Sistema de generación de aire comprimido

El compresor es el componente del sistema que capta el aire que se encuentra en la atmósfera y eleva su presión. (Serrano, 2009).

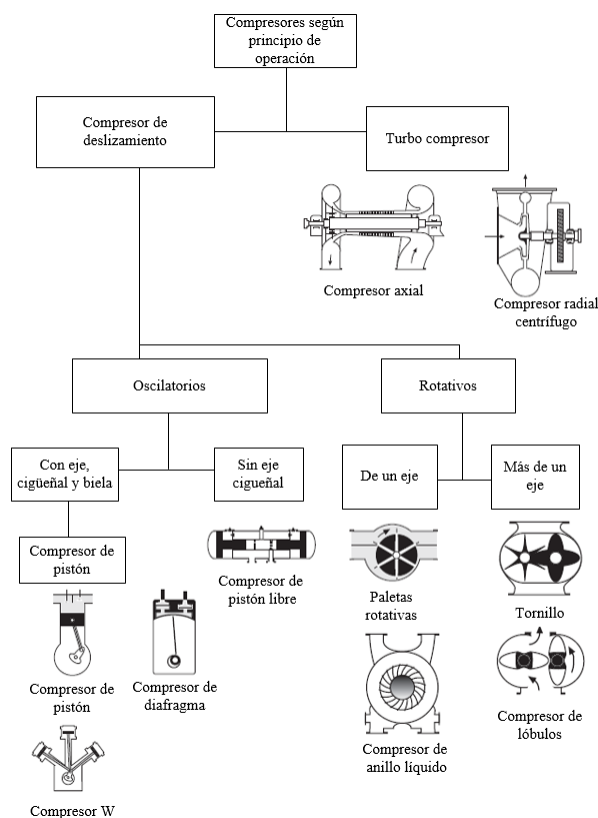
Existen varios tipos de compresores, uno de los más utilizados es el de émbolo, sin embargo, en la actualidad los compresores de tornillo han ganado espacio en el mercado, por otro lado, existen también los turbocompresores que son más utilizados en sistemas de presiones menores con caudales elevados. Los demás compresores son utilizados para otros gases o aplicaciones especiales. (Eletrobrás, 2005).

Los compresores deben ubicarse fuera de la planta de producción, pero a la vez cerca, esta decisión se justifica teniendo en cuenta que el aire fuera de la planta es más limpio que en el interior, además los compresores disponen de una mejor refrigeración por la aeración. (Serrano, 2009).

Kaeser (2010) recomienda que el compresor no debe ser seleccionado en base a la calidad del aire requerido, en el caso de compresores lubricados con aceite o libres de aceite, sino teniendo presente la economía del sistema. Los compresores tipo tornillo refrigerados por aceite para presiones desde 4 bar (58 psi) hasta 16 bar (232 psi) son más beneficiosos económicamente.

### 2.3.1.1. Tipos de compresores según el principio de funcionamiento

La Figura 5 indica los tipos de compresores que existen de acuerdo a su principio de funcionamiento.

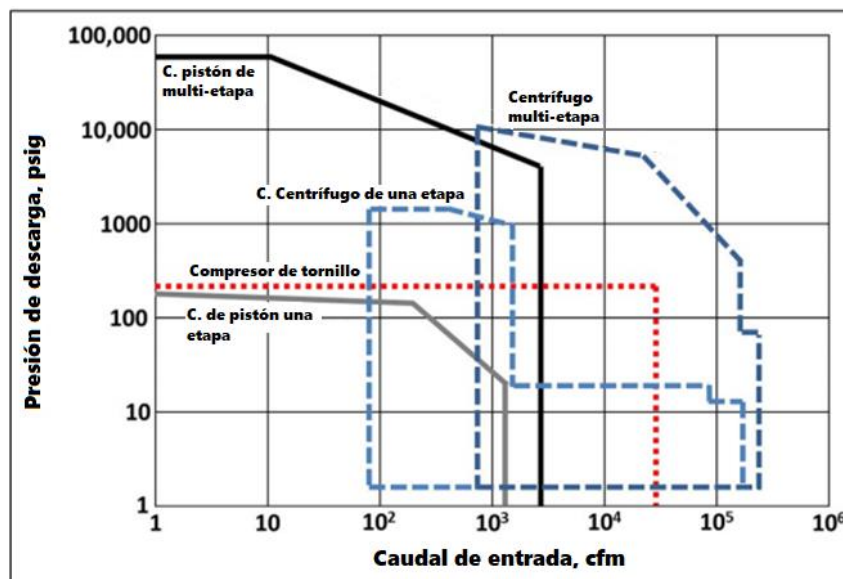


**Figura 5** Clasificación de compresores según el principio de funcionamiento.

Fuente: (Eletrobrás, 2005)



En la Figura 6 indica el régimen de presión y caudal para cada tipo de compresor.



**Figura 6** Régimen de funcionamiento de compresores por caudal y presión.

Fuente: NGPSA Engineering Data Book, 2004.

### 2.3.2. Sistema acumulador y depósito de aire comprimido

Los recipientes contenedores de aire comprimido posibilitan que los compresores operen de forma intermitente, permite suministrar aire comprimido cuando existe máxima demanda de caudal sin ocasionar caídas de presión, proporciona la capacidad de suministrar aire comprimido durante un tiempo a las unidades consumidoras mientras exista cortes de energía eléctrica, además refrigeran y condensan el aire. (Guillén, 2009).

Los acumuladores deben estar ubicados en zonas protegidas del sol y ventiladas. El tamaño del acumulador principal depende de la capacidad de los compresores y la demanda de las unidades consumidoras. (Serrano, 2009).

Kaeser (2015) recomienda en el cuarto de aire comprimido instalar dos recipientes de aire comprimido, un “contenedor húmedo” que suministra flujo estable de aire y disminuye el número

de ciclos de carga – descarga, por otro lado, un “contenedor seco” que proporcione aire para cubrir los picos de demanda de las unidades consumidoras. El “contenedor húmedo” debe ubicarse a continuación del compresor para reducir el contenido de humedad del aire. El “contenedor seco” debe ser posicionado a continuación de todos los elementos de tratamiento de aire comprimido.

### 2.3.2.1. Volumen del depósito de aire comprimido para cuarto de compresores

El tamaño del compresor está en función de la capacidad del compresor, para dimensionar el depósito de aire del compresor se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_T = \frac{V_1^0 (A - A^2)}{Z \cdot \Delta p} \quad (\text{Eletrobrás, 2005})$$

Donde:

$V_T$ : Volumen del tanque acumulador ( $m^3$ )

$\Delta p$ : Diferencia de conmutación del control del compresor (bar)

$Z$ : Máxima frecuencia permisible de entrada de carga del compresor en operación continua (para compresores Kaeser,  $Z=120$  para potencias hasta 18,5Kw,  $Z=30$  de 18,5Kw hasta 75 Kw,  $Z= 60$  75 Kw en adelante)

$V_1^0$ : Caudal de entrega del compresor ( $m^3/h$ )

$V_2^0$ : Caudal de demanda de aire ( $m^3/h$ )

$A$ : es  $V_2^0/V_1^0$  factor de utilización.

### 2.3.2.2. Volumen del depósito de aire comprimido cerca de consumidor

Existen consumidores que requieren una gran cantidad de aire comprimido en un corto periodo de tiempo, la siguiente ecuación permite dimensionar depósitos que estén cerca de las unidades consumidoras.

$$V = \frac{Q \cdot t}{P_1 - P_2} \quad (\text{Nayyar, 2000})$$

Donde,

$V$ : Volumen de tanque.

$Q$ : Caudal durante la fase de vaciado  $m^3/h$ .

$t$ : Duración de fase de vaciado.

$P_1 - P_2$ : Caída de presión permitida durante la fase de vaciado

### **2.3.3. Sistema de secado de aire comprimido**

El contenido de humedad en el aire comprimido reduce el tiempo de vida de los elementos de la red, por este motivo existe la necesidad de incluir un secador de aire en el sistema, con el fin de disminuir el contenido de humedad en el aire. (Ebel, 2009).

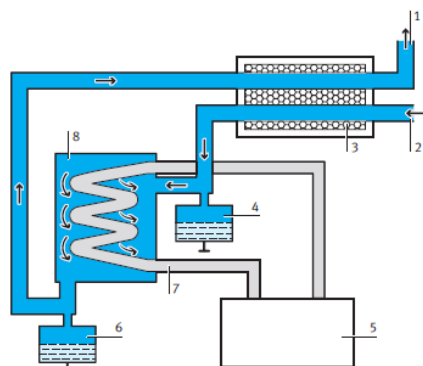
Ebel (2009) menciona tres métodos de secado de aire comprimido:

- Secado por refrigeración
- Secado por adsorción
- Secado por absorción

#### **2.3.3.1. Secado por refrigeración**

En este sistema enfría y alcanza puntos de condensación entre  $+2^\circ\text{C}$  a  $+5^\circ\text{C}$  por medio de un intercambio térmico, posteriormente el aire seco se filtra, y vuelve a ser sometido a un intercambio térmico con el aire que ingresa para elevar su temperatura. (Ebel, 2009).

Un secador frigorífico utiliza un 3% de la energía que requiere un compresor. (Kaeser, 2010).

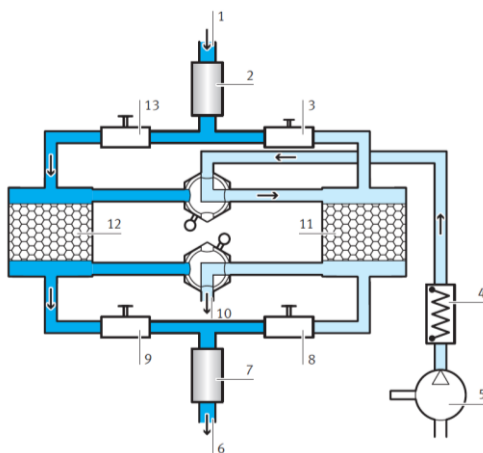


**Figura 7** Secador por refrigeración. 1) Salida de aire. 2) Ingreso de aire. 3) Intercambiador de calor aire/aire. 4) Separador. 5) Máquina de frío. 6) Separador. 7) Refrigerante. 8) Máquina frigorífica.

Fuente: (Ebel, 2009)

### 2.3.3.2. Secado por adsorción (deseccante)

Este sistema utiliza un agente de secado, material en cuya superficie se adhiere el condensado de aire comprimido, el secado por adsorción se realiza en dos etapas (Ebel, 2009). Los secadores de adsorción son exclusivamente utilizados cuando se requieren puntos de rocío entre  $-20$  a  $-70^{\circ}\text{C}$ , estos consumen entre 10 a 25 % de la energía que requiere un compresor (Kaeser, 2010).

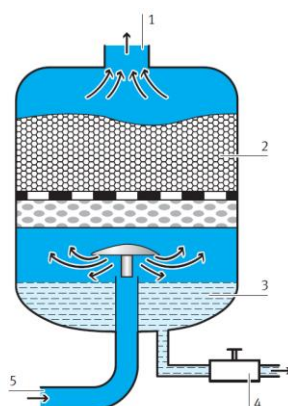


**Figura 8** 1) Válvula de cierre. 2) Filtro de aceite. 3) Válvula de cierre (cerrada) 4) Calefacción 5) Ventilador. 6) Aire seco. 7) Segundo filtro. 8) Válvula de cierre (cerrada). 9) Válvula de cierre (abierta). 10) Aire caliente. 11) Unidad 2 de adsorción. 12) Unidad 1 de adsorción. 13) Válvula de cierre (abierta).

Fuente: (Ebel, 2009)

### 2.3.3.3. Secado por absorción

Este es un proceso químico, no es muy utilizado debido a su alto costo. Este sistema presenta ventajas como facilidad de instalación, desgaste mecánico despreciable y no necesita suministro de energía de una fuente externa. En este sistema se requiere un agente de fusión, la humedad se adhiere a este y posteriormente lo disuelve. (Ebel, 2009).

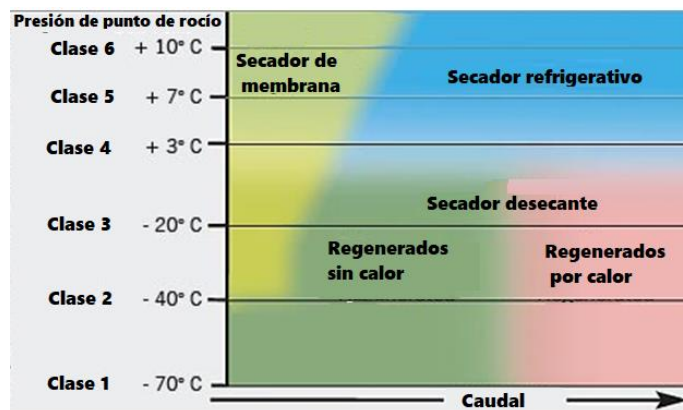


**Figura 9** 1) Salida de aire seco; 2) Agente de fusión;  
3) Condensado; 4) Descarga del condensado;  
5) Entrada de aire húmedo.

Fuente: (Ebel, 2009)

### 2.3.3.4. Régimen de funcionamiento de tipo de secadores

La Figura 10 se muestra el régimen de funcionamiento para secadores de membrana, refrigerativos y desecantes.



**Figura 10** Intervalo de secado de diferentes sistemas

Fuente: ("KAESER – Compressed air drying", 2018).

En la Tabla 4 se detalla la presión de punto de rocío de servicio y el caudal de trabajo para cada uno de ellos.

**Tabla 4**

*Cuadro comparativo de secadores.*

<b>Tipo de secador</b>	<b>Presión de punto de rocío</b>	<b>Caudal de trabajo</b>
Secadores refrigerativos	+3 °C	0,35 a 106,18 $m^3/min$ (21 a 6370,8 $m^3/h$ )
Secadores desecantes	-70 °C	0,15 a 194,2 $m^3/min$ (9 a 11652 $m^3/h$ )
Secadores de membrana	+3°C y -40°C	Hasta 4,4 $m^3/min$ (Hasta 264 $m^3/h$ )

Fuente: (Dryers – KAESER KOMPRESSOREN, 2018)

### **2.3.4. Acondicionamiento de aire**

#### **2.3.4.1. Calidad de aire comprimido**

Según OGA (2018) la clase de calidad de aire comprimido requerido para cada terminal se puede especificar a través de la norma ISO 8573 -1, dicho documento menciona las clases de calidad de aire comprimido de acuerdo a la cantidad de contaminación admisible por metro cúbico; esto permite realizar una selección óptima de los equipos de tratamiento de aire. La Tablas de la Norma ISO 8573-1 se encuentran en el Anexo B.

Según OGA (2018), se recomienda tratar el aire comprimido desde la sala de compresores para proteger la red de tuberías de distribución; la instalación de equipos de purificación de aire muchas veces resulta innecesaria, al evitar la purificación de aire excesiva la solución es más rentable.

#### **2.3.4.2. Filtro de aire comprimido**

Según Majumdar (1997) se puede utilizar filtro de aire para las siguientes funciones:

- a. Evitar el ingreso de partículas sólidas que puedan causar problemas en los componentes del sistema.

- b. Condensar y extraer el contenido de vapor de agua del aire.
- c. Remover contenido de aceite.

En la Tabla 5 detalla los tipos de filtro de aire comprimido y su uso según Beals, Ghislain, Kemp, & McCulloch (2003).

**Tabla 5**

*Tipos de filtro de aire comprimido.*

<b>Tipos de filtros de aire comprimido</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Uso</b>	<b>Ubicación</b>
Filtro de partículas	Remueve partículas sólidas.	Se recomienda usar luego de un secador desecante.
Filtro coalescente	Remueve lubricantes y humedad.	Se recomienda usar antes de un secador desecante.
Filtros absorbentes	Remueve olores.	Aplicaciones especiales.

Fuente: (Beals, Ghislain, Kemp, & McCulloch, 2003).

### **2.3.4.3. Unidad de mantenimiento**

La unidad de mantenimiento prepara, filtra, regula y lubrica el aire comprimido, se ubican al inicio de una unidad consumidora. La unidad de mantenimiento está formada por tres elementos filtro, válvula reguladora de presión, lubricador de aire comprimido (Ebel, 2009).

#### *- Filtro de aire comprimido*

Evita que el condensado, partículas de suciedad y el excedente de aceite puedan provocar el desgaste prematuro de las unidades consumidoras. (Ebel, 2009).

#### *- Válvula reguladora de presión*

Regula la presión entrante al sistema, de modo que pueda fluir la presión del aire en una condición estable y garantiza el nivel deseado de la presión en las diversas partes del sistema (Majumdar, 1997).

- *Lubricador*

El lubricador con el fin de formar una neblina de aceite y aire con la única finalidad de proporcionar lubricación a los componentes móviles. Se recomienda lubricar el aire comprimido cuando se requiere que los accionamientos se ejecuten con gran velocidad. (Ebel, 2009).

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

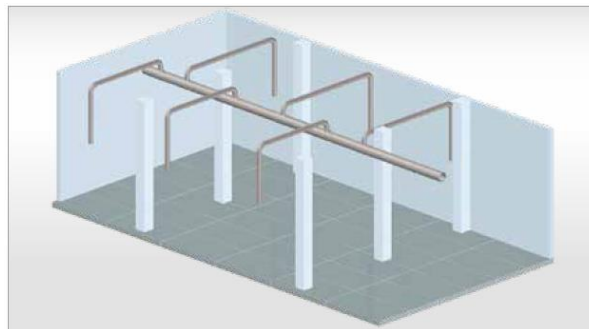
La red posee dos funciones principales, comunicar la estación generadora de aire comprimido con las unidades consumidoras y sirve como reservorio para atender la demanda. (Parker, 2003).

Atlas Copco (2011) recomienda que la caída de presión en tubería debe ser no mayor a los 0,1 bar, independientemente de la configuración del sistema de distribución de aire comprimido que se seleccione.

#### **2.3.5.1. Según el tipo de circuito de tuberías.**

- **Circuito abierto**

En el sistema de tubería abierto no es posible realizar cortes parciales para trabajos de mantenimiento, se recomienda para empresas pequeñas, la longitud de la tubería principal es corta y su costo es menor en comparación a un de circuito cerrado, sin embargo, su diámetro deberá ser mayor, en la Figura 11 se observa un esquema de esta configuración (Kaeser, 2010).



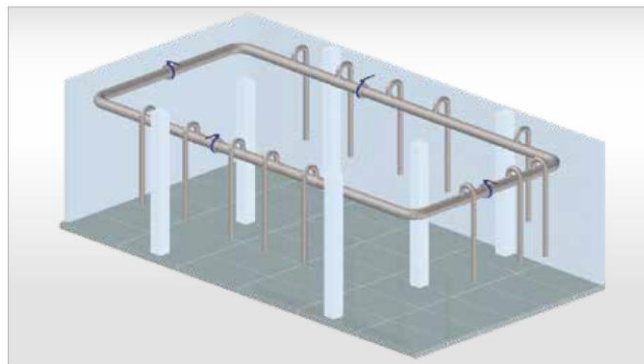
**Figura 11** Sistema de tuberías abierto.

Fuente: (Kaeser, 2010)



- **Circuito cerrado**

Este sistema proporciona una distribución uniforme de aire comprimido, permite mantener una presión constante, es posible cortar el suministro parcialmente para trabajos de mantenimiento, sin embargo, presenta mayor dificultad de instalación y su costo es mayor que el de un circuito abierto, en la Figura 12 se observa un esquema de esta configuración (Kaeser, 2010).



**Figura 12** Sistema de tuberías cerrado.

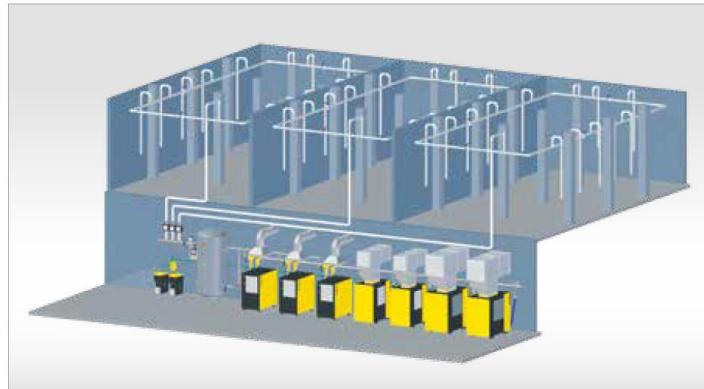
Fuente: (Kaeser, 2010)

### 2.3.5.2. Según el número de estaciones de compresores

- **Suministro con una estación**

Para un sistema con una sola estación de generación de aire comprimido, cada una de las tuberías principales para cada área debe tener la dimensión para responder a la demanda. Esta configuración permite realizar trabajos de mantenimiento sin cortar el suministro de aire (Kaeser, 2010).

Esta opción dependiendo el sistema, es más barata que usar compresores instalados localmente, al interconectar el sistema se puede reducir el consumo de energía. Al tener compresores de varias capacidades en un mismo sitio es posible promover una optimización de operación, además permite aprovechar el espacio y mejorar el control de contaminación acústica. (Eletrobrás, 2005).

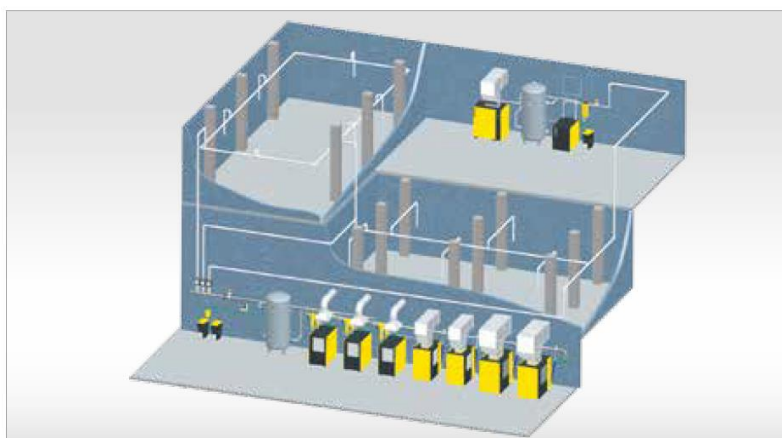


**Figura 13** Suministro con una sola estación.  
Fuente: (Kaeser, 2010)

- **Suministro con varias estaciones**

Una estación descentralizada presenta dificultades para la planificación del mantenimiento, dependiendo del sistema a veces las múltiples estaciones descentralizadas no cuentan con compresores de respaldo. (Eletrobrás, 2005)

Las estaciones descentralizadas pueden suministrar aire comprimido a unidades consumidoras distantes que represente una alta caída de presión y además atender a casos de consumidores esporádicos de gran caudal de aire. (Eletrobrás, 2005).



**Figura 14** Suministro con varias estaciones.  
Fuente: (Kaeser, 2010)

### 2.3.6. Materiales para la red de aire comprimido

Según Kaeser (2018) la selección del material tubería para un sistema de aire comprimido afecta directamente tres elementos clave: flujo, presión y calidad de aire.

Según la aplicación se utilizan varios materiales como acero, acero inoxidable, cobre, plástico, entre otros, cada uno de los materiales para tuberías de aire comprimido presenta características y prestaciones específicas esto se observa en la Tabla 6. (Kaeser, 2018).

**Tabla 6**

*Características y prestaciones del material para las tuberías.*

<b>Característica de tubería</b>	<b>Acero inoxidable CED 10</b>	<b>Acero Negro CED 40</b>	<b>Cobre</b>	<b>Aluminio</b>
Peso	Más ligero	Pesado	Ligero	Ligero
Resistencia a la corrosión	SI	NO	SI	SI
Vulnerabilidad a pérdida de presión por fricción	NO	SI	NO	NO
Resistencia mecánica	Muy fuerte	Muy Fuerte	Fuerte	Fuerte
Facilidad de instalar	Poca dificultad	Difícil	Poca dificultades	Fácil
Coste de instalación Material % / Mano de obra %	30% / 70%	25% / 75%	40% / 60%	80% / 20%
Herramientas especiales requeridas	SI	SI	Algunas (Soldador)	NO

Fuente: (Hitachi, 2014).

Los materiales que se utilizan para distribuir aire comprimido presentan tanto ventajas como desventajas, en la Tabla 7 se puede observar cada una de ellas.

**Tabla 7**

*Ventajas y desventajas de materiales utilizados para sistemas de aire comprimido.*

<b>Material</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Acero negro	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Costo de materiales moderado.</li> <li>· Disponibilidad de múltiples diámetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Largo tiempo de instalación.</li> <li>· Fugas y oxidación.</li> <li>· La rugosidad del interior promueve la formación de contaminantes provocando caídas de presión</li> </ul>
Acero Galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Costo de materiales moderado.</li> <li>· Disponibilidad de múltiples diámetros.</li> <li>· Protección ligera contra oxidación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· A menudo solo el exterior está galvanizado.</li> <li>· Largo tiempo de instalación.</li> <li>· La rugosidad del interior promueve la formación de contaminantes provocando caídas de presión.</li> <li>· Riesgo de oxidación y fugas en uniones.</li> </ul>
Acero inoxidable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>· No hay oxidación, buena calidad de aire.</li> <li>· Baja rugosidad en el interior del tubo, caída de presión mínima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Largo tiempo de instalación.</li> <li>· Alto costo del material.</li> </ul>
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> <li>· No hay oxidación, buena calidad de aire.</li> <li>· Baja rugosidad en el interior del tubo, caída de presión mínima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Requiere buena calidad de soldadura para evitar fugas.</li> <li>· La soldadura es susceptible a ciclos térmicos.</li> <li>· La instalación requiere de flama abierta.</li> </ul>
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Resistente a la corrosión.</li> <li>· Ligero.</li> <li>· Fácil de instalar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Alto costo del material.</li> </ul>

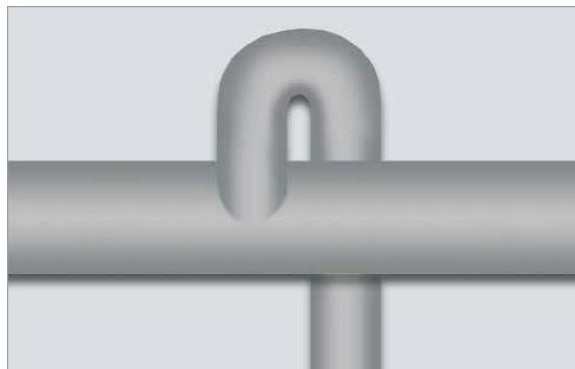
Fuente: Kaeser (2018).

### **2.3.7. Instalación correcta de la red**

La red principal que conduce aire comprimido debe tener una inclinación 2 por mil, conociendo que en el punto más bajo es indispensable colocar un aparato de separación de condensados. Para reducir la aparición de fugas la conexión de la tubería debe ser soldada o atornillada y pegada, aunque dificulte un posterior desmontaje. (Kaeser, 2010).

En el diseño de la red disminuir el número de conexiones T y ángulos rectos, con el propósito de reducir las pérdidas por fricción, se recomienda utilizar soportes para fijar la red de tubería ya sea a techos, paredes o piso, con el objetivo de evitar esfuerzos innecesarios que pueden provocar fugas. (Kaeser, 2015).

Con el propósito de evitar averías causadas por la humedad la conexión para bajantes se debe realizar por medio de un “Cuello de cisne”, observar Figura 15. (Kaeser, 2010).



**Figura 15** Conexión cuello de cisne para bajante.  
Fuente: Kaeser (2010).

## **2.4. Caída de presión en el sistema**

La caída de presión es el término utilizado para caracterizar la disminución de presión que existe entre la descarga del compresor hasta la unidad consumidora, provocada por cualquier obstrucción, restricción o rugosidad en el sistema que causa una resistencia al flujo de aire. Un sistema diseñado correctamente debe tener una pérdida de presión menor al 10% de la presión descarga del compresor, medida desde la salida del tanque receptor hasta la unidad consumidora. Una caída de presión excesiva disminuye el rendimiento e incrementa el consumo de energía. (Beals, Ghislain, Kemp, & McCulloch, 2003).

En el cuarto de generación de aire comprimido los principales elementos que causan una caída de presión significativa son los separadores de aire/lubricante, postenfriadores, separadores de

humedad, secadores y filtros. En los puntos de consumo la caída de presión más alta se da en mangueras, tubos, filtros, reguladores y lubricadores de tamaño insuficiente o con fugas. (Beals, Ghislain, Kemp, & McCulloch, 2003).

Para calcular la caída de presión en redes de aire comprimido se utiliza las siguientes fórmulas:

$$\Delta p = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{V^2}{D} \cdot L \cdot p \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión (bar),  $p$  presión (bar),  $R$  constante de gas para aire equivale a 29,27 para el aire,  $D$  Diámetro interior de temperatura (mm),  $T$  Temperatura absoluta (°K),  $L$  longitud de tubería (m),  $V$  velocidad del aire (m/s),  $\beta$  Índice de resistencia (Grado medio de rugosidad),  $G$  cantidad de aire suministrado en kg/hora.

$$\Delta p = \frac{1.6 \cdot 10^3 \cdot Q^{1.85} \cdot L}{d^5 \cdot P} \quad (\text{Majumdar, 1998})$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión (Pa),  $L$  longitud de tubería (m),  $Q$  caudal del aire ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $d$  diámetro interior del tubo (m), presión absoluta del aire en la entrada del tubo (Pa).

#### 2.4.1. Pérdida admisible en elementos del sistema

La Tabla 8 indica la caída de presión para cada uno de los componentes del cuarto de generación de aire comprimido para un sistema nuevo según Atlas Copco (2011), sin embargo, estos valores varían de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

**Tabla 8**

*Caída de presión para cada uno de los componentes del cuarto de generación de aire comprimido.*

Componente	Caída de presión
Filtro de aceite	0,14 bar (2 psi)
Secador refrigerativo	0,09 bar (1,3 psi)
Filtro de polvo	0,20 bar (2,9 psi)
Tubería en la central de compresores	0,05 bar (0,7 psi)

Fuente: Atlas Copco, 2011.

La Tabla 9 muestra la caída de presión recomendada para tuberías fijas en el sistema aire comprimido de acuerdo a Atlas Copco (2011).

**Tabla 9**

*Recomendación para caída de presión en tuberías fijas.*

Caída de presión en las tuberías de servicio	0,03 bar
Caída de presión en las tuberías de distribución	0,05 bar
Caída de presión en tuberías verticales	0,02 bar
<b>Caída de presión total en la instalación de tuberías fijas</b>	<b>0,10 bar</b>

Fuente: (Atlas Copco, 2011)

## 2.5. Dimensionamiento del sistema de aire comprimido

### 2.5.1. Efecto de la altitud sobre sistemas de aire comprimido

La presión atmosférica como la temperatura ambiente se reduce conforme aumenta la altitud sobre el nivel del mar. Esto afecta la relación de presiones de los compresores, esto incide en el consumo energético y el consumo de aire. El Anexo D muestra presiones y temperaturas estándar a distintas altitudes. (Atlas Copco, 2011).

### 2.5.2. Factor de simultaneidad, $F_s$

Este factor indica el número de equipos que operan simultáneamente. (Hesse, 2002).

Los factores de simultaneidad de acuerdo al número de unidades consumidoras se encuentran en el Anexo E.

### 2.5.3. Factor de utilización, $F_U$

Las unidades consumidoras no requieren aire todo el tiempo. El factor de utilización representa la fracción de tiempo en la cual la unidad o actuador consume aire comprimido. (Hesse, 2002).

$$F_u = \frac{\text{Tiempo de utilización}}{\text{Tiempo de jornada laboral}} \quad (\text{Hesse, 2002})$$

#### 2.5.4. Factor de fugas y ampliación.

Por posibles modificaciones en los datos de demanda prevista y futuros requerimientos de aire comprimido se recomienda añadir un margen del 10 a 20%. (Atlas Copco, 2011).

#### 2.5.5. Caudal de Aire Libre, $Q_{FAD}$

Se define como el caudal en condiciones normales es decir, de acuerdo a CAGI (2016), temperatura en condiciones normales es  $T_N = 20^\circ\text{C}$  y la presión atmosférica en condiciones normales  $P_N = 1 \text{ bar}$ .

#### 2.5.6. Caudal real, $Q_R$

Para determinar el caudal real  $Q_R$  se multiplica el factor de uso  $F_u$ , el factor de simultaneidad  $F_s$ , el factor de fugas por el caudal de aire comprimido a condiciones ambientales locales. (Eletrobrás, 2005).

$$Q_R = F_u \cdot F_s \cdot F_{fugas} \cdot \quad (\text{Eletrobrás, 2005})$$

#### 2.5.7. Longitud equivalente

Los accesorios y válvulas de la red generan una pérdida de presión en la red, se calcula una longitud equivalente de cada uno de dichos elementos ( $L_{equiv}$ ) y se suma a la longitud de tubería ( $L_{tub}$ ). La longitud total ( $L_{total}$ ) se puede calcular por medio de la siguiente ecuación. (Hesse, 2002).

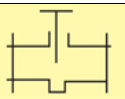

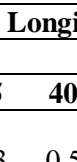
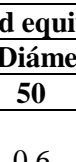
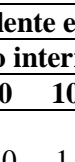
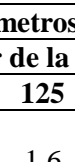
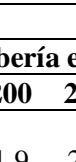
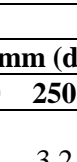
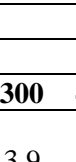
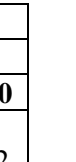


$$L_{total} = L_{tub} + \sum_{i=1}^n L_{equiv} \quad (\text{Hesse, 2002})$$



La Tabla 10 muestra la longitud equivalente para cada uno de los accesorios de la red de acuerdo al diámetro interno.

**Tabla 10**

*Longitud equivalente en metros.*

Componente		Longitud equivalente en metros										
		Diámetro interior de la tubería en mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Válvula bola totalmente abierta		0,3 5	0,5 8	0,6 10	1,0 16	1,3 20	1,6 25	1,9 30	2,6 40	3,2 50	3,9 60	5,2 80
Válvula de diafragma totalmente abierta		1,5	2,5	3,0	4,5	6	8	10	-	-	-	-
Válvula angular totalmente abierta		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo		7,5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Válvula anti retorno de clapeta		2,0	3,2	4,0	6,4	8	10	12	16	20	24	32
Codo R=2d		0,3	0,5	0,6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,4	3,0	3,6	4,8
Codo R=d		0,4	0,6	0,8	1,3	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4
Angulo 90°		1,5	2,4	3,0	4,8	6,0	7,5	9	12	15	18	24
Te, salida en línea		0,3	0,4	1,0	1,6	2,0	2,5	3	4	5	6	8
Te, salida angular		1,5	2,4	3,0	4,8	6,0	7,5	9	12	15	18	24
Reductor		0,5	0,7	1,0	2,0	2,5	3,1	3,6	4,8	6,0	7,2	9,6

Fuente: Eletrobrás, 2005.

Para facilitar el cálculo se puede multiplicar la longitud de tubería por un factor de 1,6. Como se muestra en la siguiente ecuación. (Hesse, 2002).

$$L_{total} = 1,6 L_{tub}$$

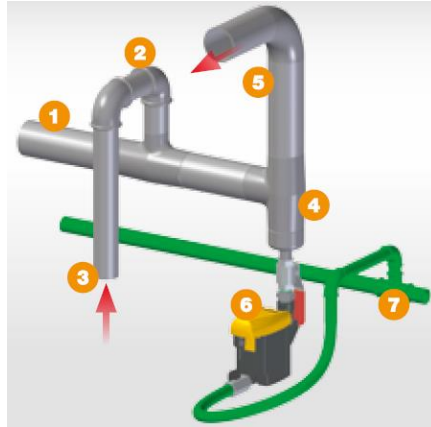
## **2.6. Planificación de cuarto de compresores**

El cuarto de compresores debe ofrecer economía en su operación y estar planificada para futuras ampliaciones. (Atlas Copco, 2011).

El área destinada para los compresores debe ser amplio, bien ventilado y sin polvo, protegido de la lluvia, los equipos deben ubicarse en una superficie nivelada, no requieren anclaje o cimentación especial, sin embargo, los tanques deben ser anclados al piso por seguridad. (FIAC, 2018).

Utilizar una unión flexible o manguera entre la tubería y la descarga del compresor con el fin de proteger el postenfriador del compresor. Montar válvulas esfera que permitan realizar mantenimiento sin despresurizar toda la línea. No colocar filtros en zonas muy altas o cercanas al suelo, esto complica la instalación de drenes de condensado, el montaje de filtros debe ser horizontal. Evitar ubicar los compresores en sitios donde se encuentren expuestos a humedad excesiva tales como lluvia, salidas de vapor, venteo de secadores, etc. (Kaeser, 2015).

Para evitar que el condensado formado en el manifold principal se drene hacia el compresor, la salida del compresor debe conectarse al manifold desde la parte superior. Ver Figura 16. (Bruno, s.f.).



**Figura 16** Manifold y dren de condensados para cuarto de compresores. 1) Manifold principal, 2) Cuello de cisne, 3) Conexión de compresor, 4) Trampas para condensado de Manifold principal, 5) Hacia la red de aire comprimido, 6) Dren de condensado. 7) Manifold de condensado.

Fuente: (Kaeser, 2010)

## 2.7. Regulación de compresores

Los sistemas de regulación dependen del tipo de compresor, variaciones de presión admisibles, variaciones en el consumo y pérdida de energía aceptables. La selección del método de regulación adecuado posibilita a la planta a trabajar en forma óptima en diferentes situaciones, genera un ahorro en el consumo de energía, disminuye el riesgo de paradas no planificadas, y permite mejorar el grado de utilización de la capacidad instalada. (Atlas Copco, 2011).

### 2.7.1. Según la demanda de aire

#### 2.7.1.1. Carga base

Es el caudal de aire comprimido que requiere el sistema de manera constante. (Kaeser, 2010).

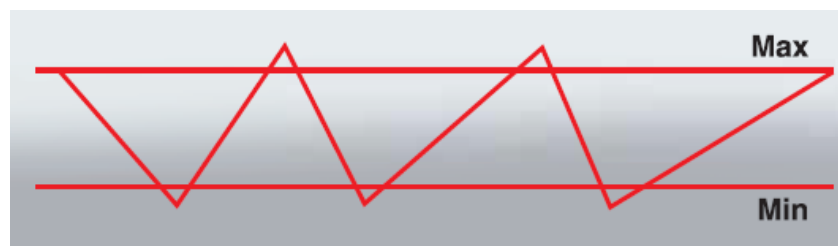
### 2.7.1.2. Carga punta

Es la cantidad de aire comprimido que demanda el sistema en momentos determinados. Es variable ya que el requerimiento de las unidades consumidoras es diferente. Para cubrir esta demanda es necesario incluir en el sistema compresores con distintos controladores. (Kaeser, 2010).

## 2.7.2. Según el controlador interno del compresor

### 2.7.2.1. Modo de control simple

Es el principio de regulación más común en el que consiste en “producir aire” o “no producir aire”. El compresor opera dentro de un valor de presión mínima (carga) y un valor de presión máxima (descarga). (Atlas Copco, 2011).

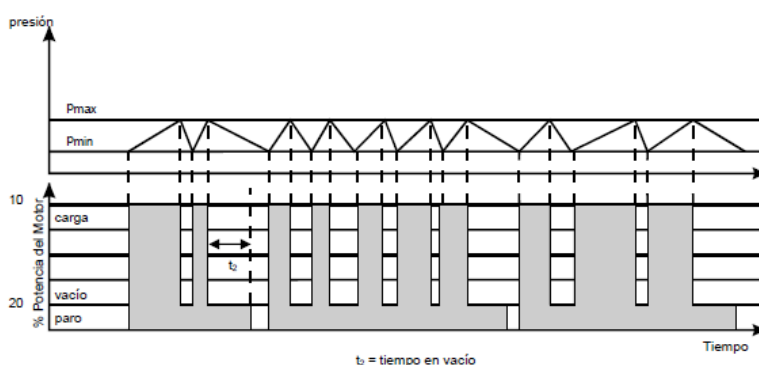


**Figura 17** Banda de presión Min - Max dentro de la cual funciona el compresor.

Fuente: (Atlas Copco, 2011).

### 2.7.2.2. Modo de control Dual

El compresor funciona en carga-vacío-encendido-apagado, incluye dos temporizadores, uno determina cuando el motor opere en estrella antes de conmutar a delta, y el otro controla el tiempo que el motor permanece en vacío antes de apagarse.

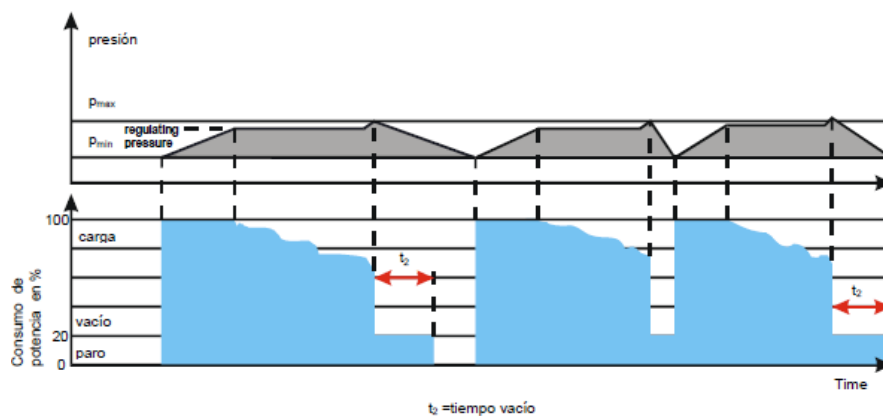


**Figura 18** Modo de control Dual.

Fuente: (Kaeser, 2010)

### 2.7.2.3. Modo de control de modulación

El compresor modifica proporcionalmente su entrega al controlar su válvula de admisión para regular la cantidad de aire que el compresor admite. Esta regulación es adecuada en un sistema donde exista un tanque de almacenamiento pequeño o ninguno.

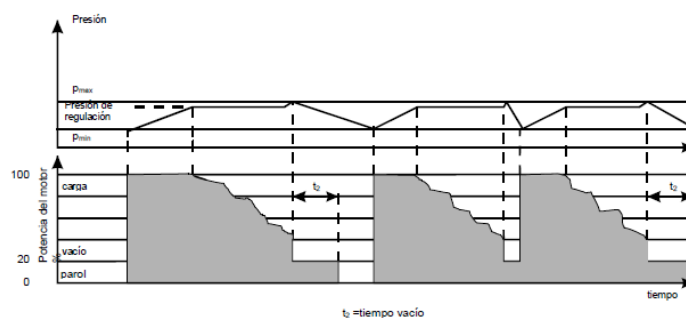


**Figura 19** Control de modulación.

Fuente: (Kaeser, 2010)

### 2.7.2.4. Convertidores de frecuencia

Son compresores que poseen un motor cuya velocidad se puede controlar electrónicamente, lo que permite suministrar aire comprimido dentro de un rango de presión muy estrecho. (Atlas Copco, 2011).



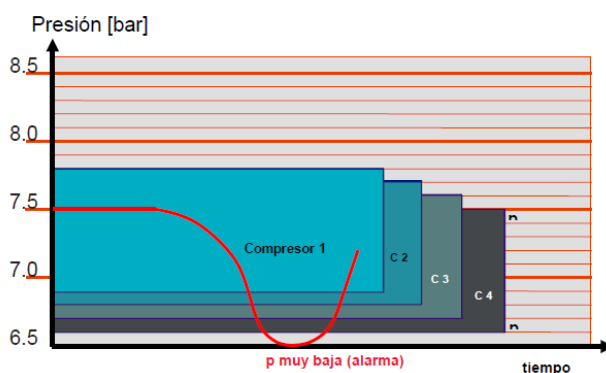
**Figura 20** Regulación continua del caudal a través de la velocidad de giro de motor.

Fuente: (Kaeser, 2010)

## 2.8 Sistema de control de compresores

### 2.8.1. Control en cascada

Para este sistema a cada compresor se le asigna un punto inferior y uno superior de conmutación, se recomienda conectar un máximo de cuatro compresores, si se excede este número el consumo energético y las fugas pueden ser muy altas debido a la alta fluctuación de presión. (Kaeser, 2010).



**Figura 21** Control de compresores por cascada.

Fuente: (Kaeser, 2010).

### 2.8.2. Control por gama de presión

Este sistema requiere un PLC secuenciador o una computadora industrial, el controlador determina que compresor debe operar según el número de horas de trabajo que tenga. Este sistema opera con un diferencial de presión menor al control por cascada. (Kaeser, 2010).

## 2.9. Consumo de energía del compresor

### 2.9.1. Potencia eléctrica consumida

“La potencia eléctrica consumida por el motor es igual a la potencia suministrada al eje más las pérdidas eléctricas y mecánicas internas del motor. La potencia ideal para un punto nominal se calcula con la siguiente fórmula”. (Kaeser, 2015)

$$P_{ec} = U_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \varphi_n$$

Donde:

$P_{ec}$ : Potencia eléctrica consumida (Kw)

$U_n$ : Voltaje de línea (V)

$I_n$ : Amperaje de línea (A)

$\cos \varphi_n$ : Factor de potencia

### 2.9.2. Potencia específica

La potencia específica es la relación entre la potencia eléctrica consumida y el caudal suministrado a una presión de operación determinada. (Kaeser, 2015).

$$P_{espc} = \frac{\text{Potencia eléctrica consumida}}{\text{Caudal FAD de compresor}}$$

Para cálculo de rentabilidad se divide el consumo total de electricidad a presión máxima para el caudal a presión máxima.

## 2.10. Indicadores de rentabilidad

### 2.10.1. Periodo de recuperación de inversión (PR)

Este indicador permite identificar el tiempo que necesita la empresa para recuperar la inversión a partir de las entradas de efectivo. El tiempo de recuperación admisible se lo determina de manera

subjetiva. Para determinar el tiempo de recuperación se lo hace a partir de los flujos de caja anuales y flujos de caja anuales acumulados para cada uno de los años de vida útil del proyecto, se indica que existe un retorno de la inversión una vez que el flujo anual acumulado empieza a ser positivo. (Canales, 2015)

### **2.10.2. Valor actual neto (VAN)**

El Valor actual neto indica los beneficios alcanzados por el proyecto en su vida útil, después de recuperar la inversión inicial y generar una ganancia. Este valor se acepta si es mayor o igual a cero, se lo obtiene a partir de la siguiente fórmula (Canales, 2015).

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t}$$

*Donde:*

*VAN: Valor actual neto*

*I<sub>0</sub>: Inversión inicial*

*FC: Flujo de caja anual*

*i: Tasa de corte*

*t: número de períodos de vida útil del proyecto*

### **2.10.3. Tasa de interna de retorno (TIR)**

“La tasa interna de retorno representa la tasa de interés a la cual se debe restar los flujos de efectivos alcanzados por el proyecto a través de su vida económica para que estos se igualen a la inversión”. (Canales, 2015).

Para aceptar el TIR, esta debe ser mayor o igual a la tasa de corte. Se calcula a través de la interpolación de la siguiente fórmula. (Canales, 2015).



$$TIR = i_1 + \left[ (i_2 - i_1) \frac{(VAN_1)}{|VAN_1| + |VAN_2|} \right]$$

*Donde:*

$i_1$ : Tasa de corte, con la que se calcula el VAN del proyecto y cuyo resultado debe ser positivo

$i_2$ : Tasa de corte, con la que se calcula el VAN del proyecto y cuyo resultado debe ser negativo

$|VAN_1|$ : VAN positivo en valor absoluto

$|VAN_2|$ : VAN negativo en valor absoluto

#### **2.10.4. Relación Beneficio-Costo (B/C)**

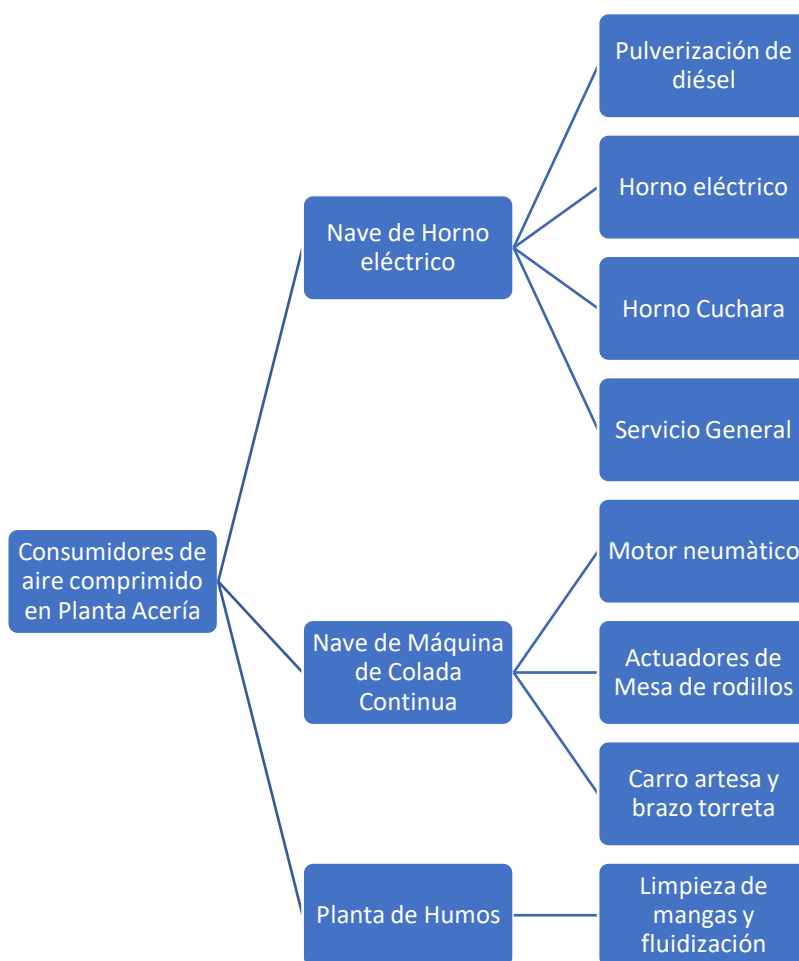
La relación Beneficio-Costo es la relación existente entre el Valor Presente de Ingresos totales y los Costos totales del proyecto. El proyecto se considera rentable si la relación Beneficio-Costo es mayor a 1. Se calcula a partir de la siguiente fórmula. (Morín, 2017).

$$\frac{\text{Ingresos totales}}{\text{Costos totales}} > 1$$

## CAPITULO III

### 3.INGENIERÍA BÁSICA

Cada red de aire comprimido es única, sin embargo, en todas se aplican los mismos principios básicos. El diseño del sistema inicia con la elaboración de un diagrama, donde se detalla las unidades consumidoras de aire comprimido, se indica la demanda y presión de operación requerida por cada unidad consumidora de aire comprimido. Posteriormente estos datos fueron tabulados para determinar el caudal requerido por todo el sistema.



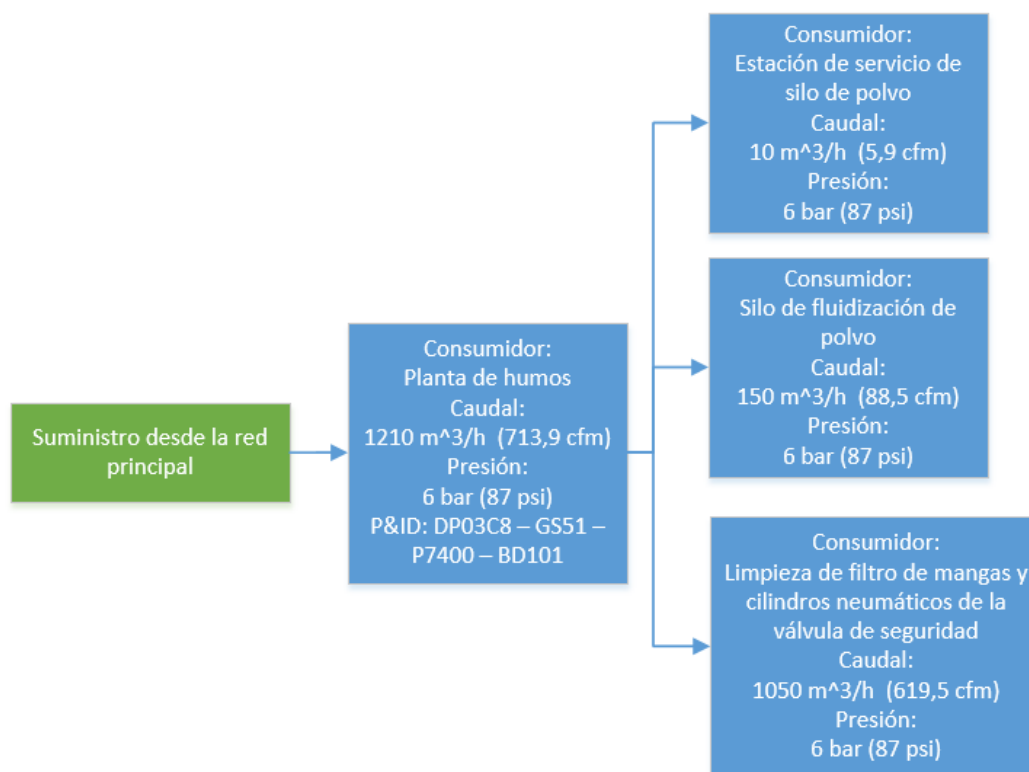
**Figura 22** Principales consumidores de aire comprimido de para la Planta Acería de Andec S.A.

Fuente: (Andec S.A., 2018)

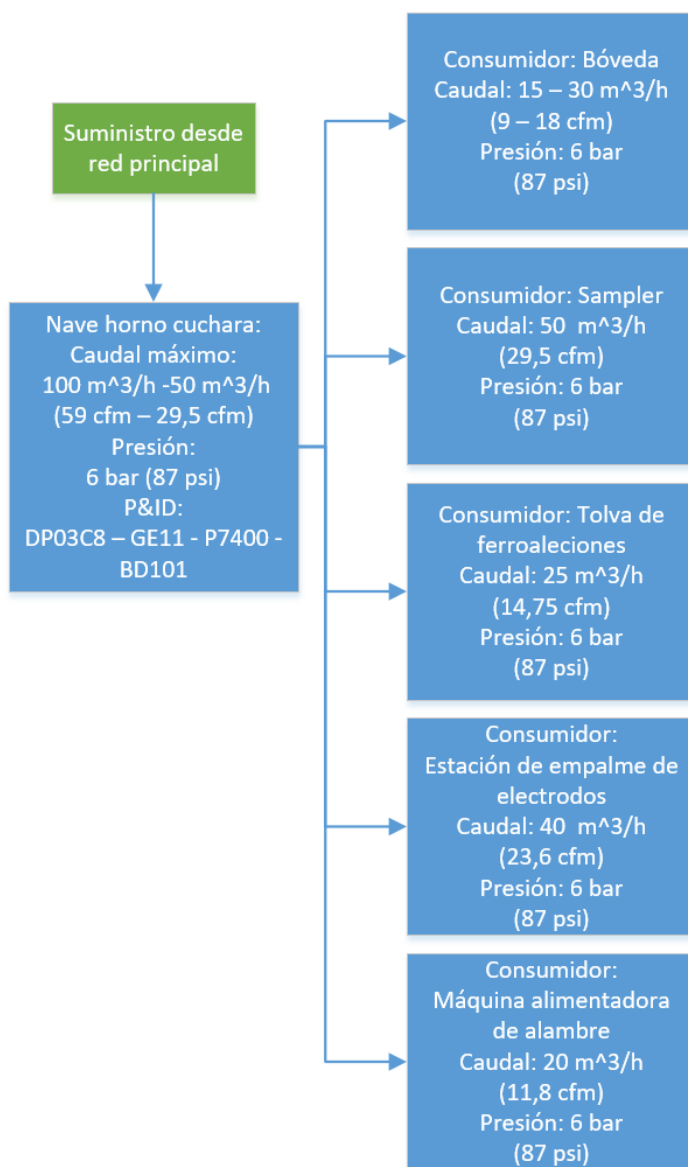
En la Figura 22 se detalla los principales consumidores de aire comprimido para la Nave de Horno Eléctrico, Nave de la Máquina de Colada Continua y Planta de Humos de la planta industrial de Andec S.A.

### 3.1. Distribución de aire comprimido e identificación de unidades consumidoras en la Planta

La Figura 23, 24 y 38 (ubicada en el Anexo G) muestran la distribución de aire comprimido para la planta de Humos, Nave de Horno y Nave MCC respectivamente, se incluye el requerimiento de caudal y presión de cada unidad consumidora. Esta información se encuentra en los P&ID del fabricante Danieli.



**Figura 23** Distribución de aire comprimido en Planta de Humos  
Fuente: (Fabricante Danieli, 2018).



**Figura 24** Distribución de aire comprimido en Horno Cuchara.  
Fuente: (Fabricante Danieli, 2018).

### 3.2. Condiciones ambientales

El aire de la atmósfera contiene humedad en cantidad variable y depende de las condiciones ambientales en un lugar y momento en particular. Según EXA (2018), en la Tabla 11 se muestra las condiciones ambientales en la ciudad de Guayaquil, lugar en el cual se instalará el sistema de aire comprimido.

**Tabla 11**

*Condiciones ambientales en la ciudad de Guayaquil del año 2018.*

	<b>Rango de variación Año 2018</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	20 a 35
<b>Humedad (%)</b>	75 a 84
<b>Presión atmosférica (milibares)</b>	1007,5

Fuente: (EXA, 2018)

### 3.3. Demanda de aire comprimido por la Planta de Acería

Para calcular la demanda real de aire comprimido que requiere la planta de Acería de Andec S.A. es necesario considerar los factores de utilización y simultaneidad, se levantó información de la secuencia de funcionamiento de cada una de las unidades consumidoras.

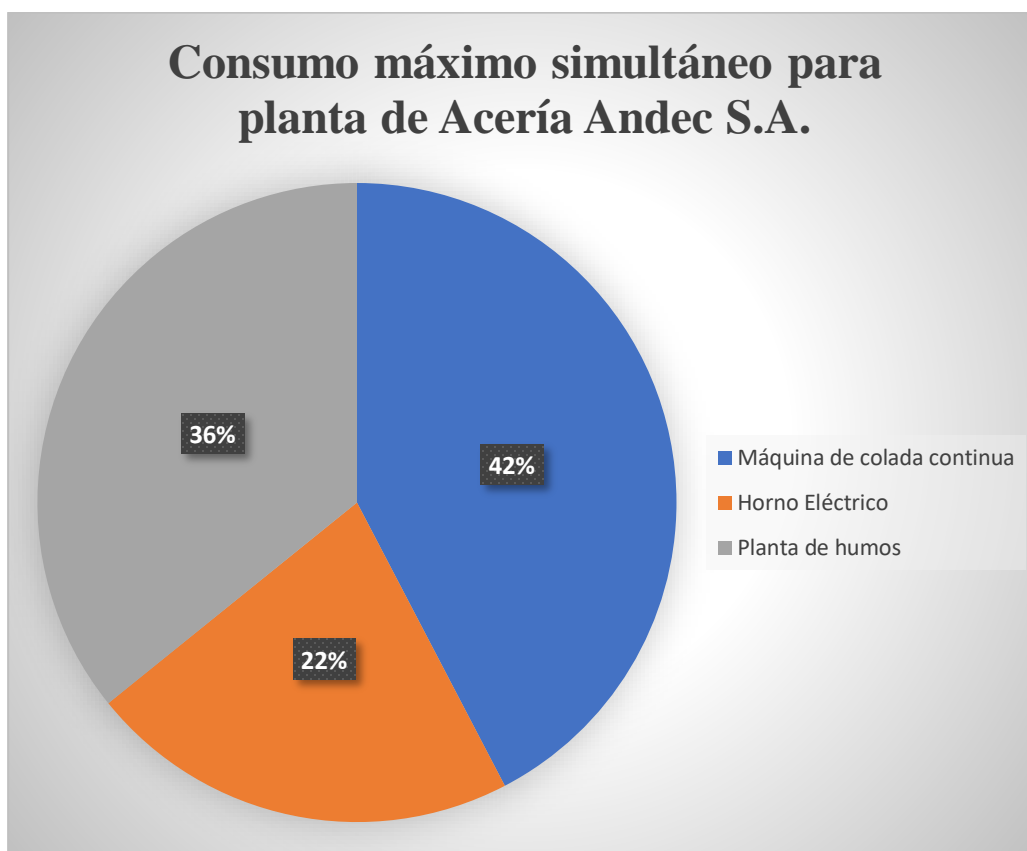
La Tabla 12 y la Figura 25 muestran en resumen de requerimiento de aire comprimido para la nave del Horno eléctrico, nave de la Máquina de Colada Continua y Planta de Humos de la Acería de Andec S.A.

**Tabla 12**

*Caudal máximo simultáneo de aire comprimido por área en la Planta de Acería de ANDEC S.A.*

<b>Área</b>	<b>Caudal real</b>
Nave de Máquina de colada continua	1114,2 m <sup>3</sup> /h (655,8 cfm)
Nave de Horno Eléctrico	574,6 m <sup>3</sup> /h (338,2 cfm)
Planta de humos	941,6 m <sup>3</sup> /h (554,2 cfm)
<b>Total</b>	<b>2630,4 m<sup>3</sup>/h (1548,2 cfm)</b>

Fuente: (Fabricante Danieli, 2018).



**Figura 25** Caudal máximo simultáneo para planta de Acería ANDEC S.A.  
Fuente: (Fabricante Danieli, 2018).

En las Tablas 13, 14, 15 y 16 se detalla los principales consumidores de aire comprimido para cada una de estas áreas de la Planta de Acería.

### **3.3.1.1. Demanda de aire en la Nave de Máquina de Colada Continua**

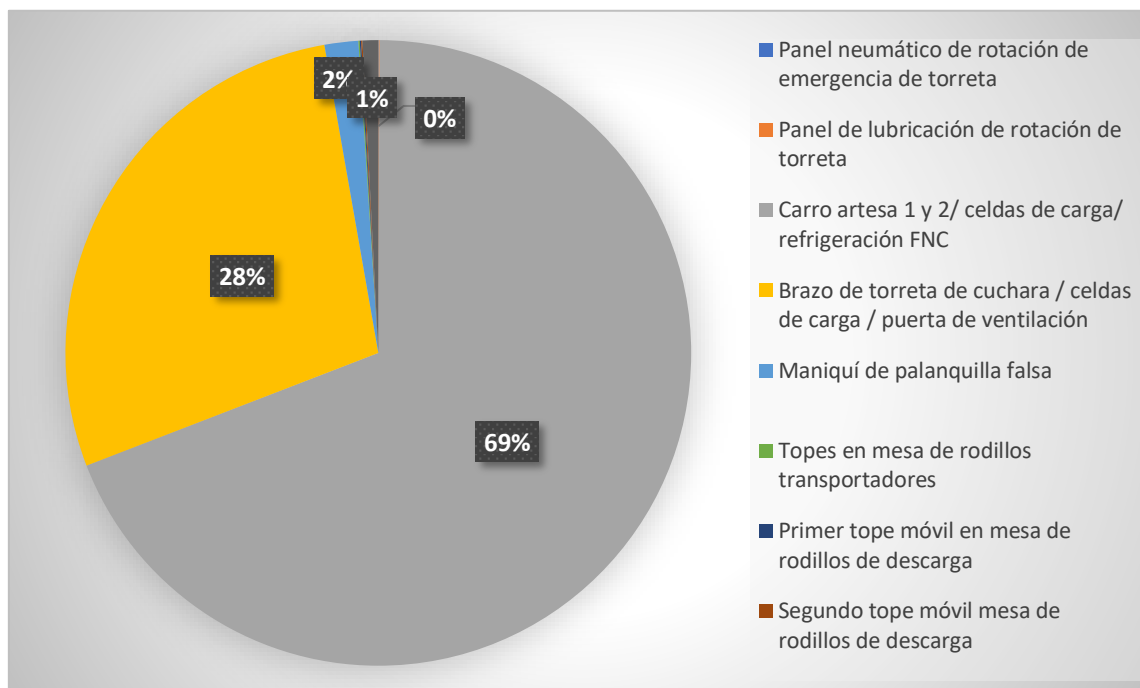
La Tabla 13 muestra el caudal, presión, calidad de aire, factores de simultaneidad y utilización que le corresponde cada una de las unidades consumidoras de la Nave de la Máquina de Colada Continua.

**Tabla 13**

*Demanda de aire comprimido para Máquina de Colada Continua.*

	$Q_N$ indv. $Nm^3/h$	$Q_{CAL}$ indv. $m^3/h$	<i>Cant</i>	$Q_{CAL}$ $m^3/h$	$F_u$	$F_s$	$Q_{REAL}$ $m^3/h$	Porcent. de consumo	Presión (bar)	Tipo de aire
Panel neumático de rotación de emergencia de torreta	480	522,80	1	522,79	3E-04	1	0,2086	0,02%	5	CA
Panel de lubricación de rotación de torreta	20	21,78	1	21,78	0,021	1	0,5219	0,05%	6	CA
Carro artesa 1 y 2/ celdas de carga/ refrigeración FNC	320	348,53	2	697,06	1	0,94	769,55	69,07%	3	CA
Brazo de torreta de cuchara / celdas de carga / puerta de ventilación	250	272,29	1	272,28	1	1	313,13	28,10%	3	CA
Maniquí de palanquilla falsa	123	133,97	3	401,89	0,044	0,89	19,412	1,74%	5	CA
Topes en mesa de rodillos transportadores	56	60,99	3	182,98	0,004	0,89	0,7838	0,07%	5	CA
Primer tope móvil en mesa de rodillos de descarga	56	60,99	3	182,98	0,004	0,89	0,7676	0,07%	5	CA
Segundo tope móvil mesa de rodillos de descarga	56	60,99	3	182,98	0,004	0,89	0,7676	0,07%	5	CA
Refrigeración de células fotoeléctricas	2	2,18	4	8,71	0,900	1	9,0182	0,81%	3,5	CA
Válvulas de sistema de enfriamiento de Molde	10	10,89	2	21,78	7E-05	0,94	0,0017	0,00%	6	CA
Válvulas neumáticas ON /OFF - Enfriamiento secundario	5	5,45	4	21,78	7E-05	0,86	0,0016	0,00%	6	CA
Válvulas reguladoras de flujo del circuito de refrigeración primario/ secundario/ terciario	8,6	9,37	18	168,60	7E-05	0,65	0,011	0,00%	4	IA
							<b>Tot.</b> 1114,2			

Fuente: (ANDEC S.A., 2018)



**Figura 26** Caudal máximo simultáneo requerido en la Máquina de Colada Continua.  
(Fuente: Andec S.A., 2018)

En la Figura 26 se observa el porcentaje de consumo de aire comprimido de cada unidad consumidora, respecto al total de aire demandado por la Nave de Máquina de Colada Continua.

### 3.3.1.2. Demanda de aire Nave de Horno Eléctrico y Nave Horno Cuchara

La Tabla 14 y 15 muestra el caudal, presión, calidad de aire, factores de simultaneidad y utilización que le corresponde cada una de las unidades consumidoras de la Nave de Horno Eléctrico y Horno Cuchara. Para el cálculo de caudal se consideró un 15% de fuga.



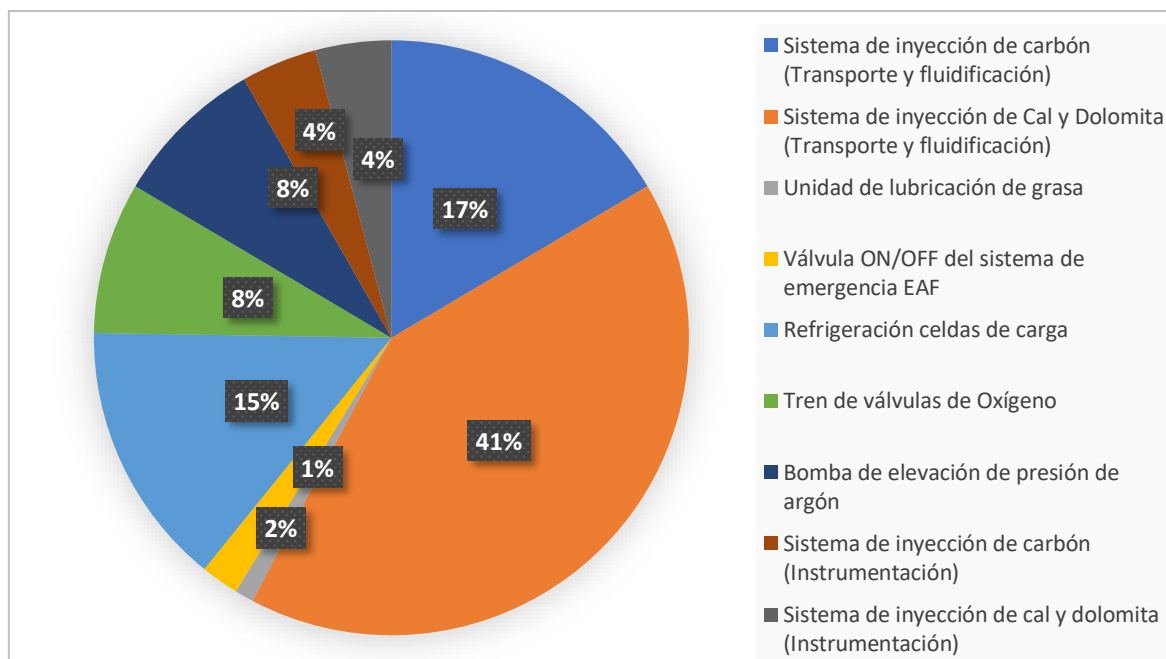
**Tabla 14***Demanda de aire comprimido para Horno Eléctrico.*

	$Q_N$ indiv. $Nm^3/h$	$Q_{CAL}$ indiv. $m^3/h$	$Can$ $t$	$Q_{CAL}$ $m^3/h$	$F_u$	$F_s$	$Q_{REAL}$ $\frac{m^3}{h}$	Porcentaje de consumo	Presión (bar)	Tipo de aire
Sistema de inyección de carbón (Transporte y fluidificación)	80	87,13	1	87,1325	0,666	1	66,73	12,61%	6	CA
Sistema de inyección de Cal y Dolomita (Transporte y fluidificación)	200	217,83	2	435,662	0,666	0,94	320,3	60,54%	6	CA
Unidad de lubricación de grasa	5	5,45	1	5,44578	0,021	1	0,131	0,02%	5	CA
Válvula ON/OFF del sistema de emergencia EAF	10	10,89	1	10,8915	7E-05	1	0,001	0,00%	6	CA
Refrigeración celdas de carga	70	76,24	2	152,482	0,833	0,94	140,2	26,51%	2	CA
Tren de válvulas de Oxígeno	40	43,57	4	174,265	0,007	0,86	1,278	0,24%	6	CA
Bomba de elevación de presión de argón	40	43,57	1	43,5663	2E-05	1	0,001	0,00%	6	IA
Sistema de inyección de carbón (Instrumentación)	20	21,78	1	21,7831	0,007	1	0,177	0,03%	6	IA
Sistema de inyección de cal y dolomita (Instrumentación)	20	21,78	1	21,7831	0,007	1	0,178	0,03%	6	IA

Fuente: (Andec S.A., 2018)

**Subt 529,1**

La Figura 27 indica el porcentaje de consumo de aire comprimido de cada una de las unidades consumidoras, respecto al total del aire demandado por la Nave de Horno Eléctrico.



**Figura 27** Caudal máximo simultáneo requerido para Horno Eléctrico.

Fuente: (Andec S.A., 2018)

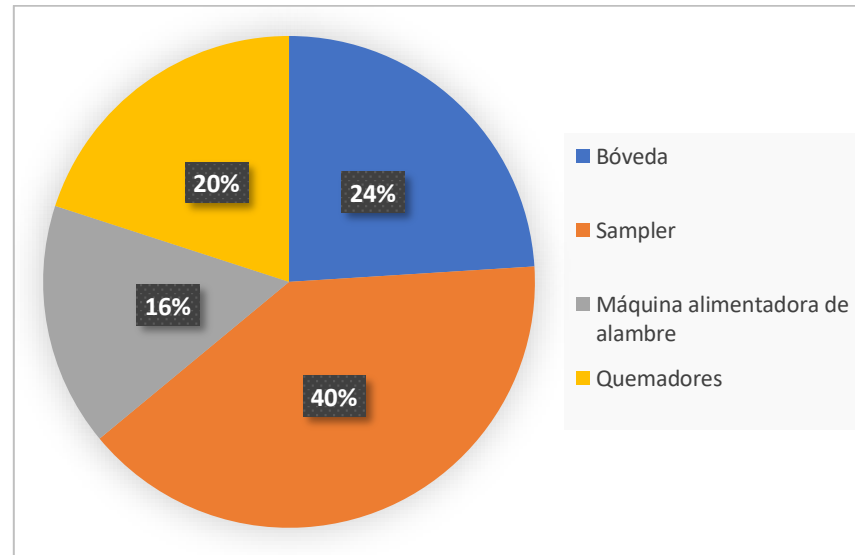
La Tabla 15 detalla los principales consumidores de aire comprimido de la Horno Cuchara.

La Figura 28 indica el porcentaje de consumo de aire comprimido de cada una de las unidades consumidoras, respecto al total del aire demandado por la Nave de Horno Cuchara.

**Tabla 15***Demanda de aire comprimido para Horno Cuchara.*

	$Q_N$ indiv. $Nm^3/h$	$Q_{CAL}$ indiv. $m^3/h$	<i>Cant.</i>	$Q_{CAL}$ $m^3/h$	<i>Fu</i>	<i>Fs</i>	$Q_{REAL}$ $m^3/h$	Porcentaje de consumo	Presión (bar)	Tipo de aire
Bóveda	30	32,67	1	32,67	0,125	1	4,697	10,33%	6	CA
Sampler	50	54,46	1	54,46	0,0104	1	0,6519	1,43%	6	CA
Máquina alimentadora de alambre	20	21,78	1	21,78	0,0014	1	0,0346	0,08%	6	CA
Quemadores	25	27,23	2	54,46	0,6666	0,94	40,077	88,16%	6	CA
							<b>Subtotal</b>	45,46		
							<b>Total</b>	574,57		

Fuente: (Andec S.A.,2018)

**Figura 28** Caudal máximo simultáneo requerido para Horno Cuchara.

Fuente: (Andec S.A.,2018)

### 3.3.1.3. Demanda de aire comprimido de la Planta de Humos

La Tabla 16 y Figura 29 detalla los principales consumidores de aire comprimido de la Planta de humos.

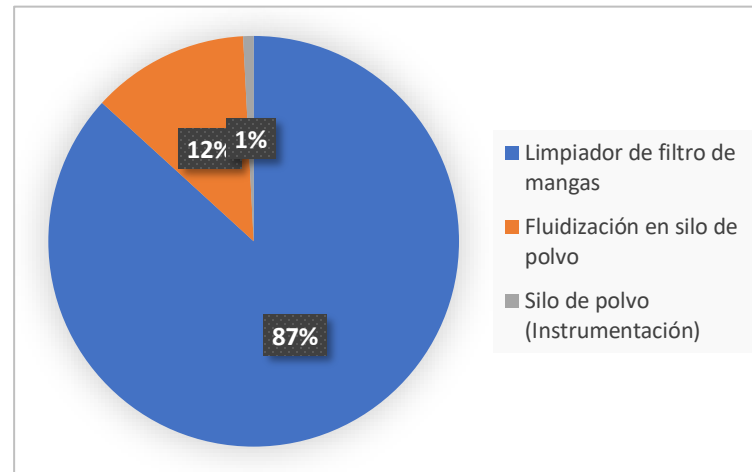
**Tabla 16**

*Demanda de aire comprimido para Planta de Humos.*

	$Q_N$ indiv. $Nm^3/h$	$Q_{CAL}$ indiv. $m^3/h$	<i>Cant.</i>	$Q_{CAL}$ $m^3/h$	$F_u$	$F_s$	$Q_{REAL}$ $m^3/h$	Porcentaje de consumo	Presión (bar)	Tipo de aire
Limpiador de filtro de mangas	1050	1143,61	1	1143,61	0,713	1	937,65	99,58%	6	CA
Fluidización en silo de polvo	150	163,37	1	163,37	0,0208	1	3,91	0,42%	6	CA
Silo de polvo (Instrumentación)	10	10,89	1	10,89	7E-05	1	9E-04	0,00%	6	IA

Fuente: (Andec S.A.,2018)

**Total 941,57**



**Figura 29** Caudal máximo simultáneo requerido para Planta de Humos.

Fuente: (Andec S.A., 2018)

### 3.3.1.4. Ejemplo de cálculo de Factor de Simultaneidad y Utilización

La memoria de cálculo para el factor de utilización y simultaneidad se muestra en el Anexo F.

#### - Factor de utilización

Para este cálculo se considera que el motor neumático funciona 1 vez al día durante 30 segundos.

$$F_u = \frac{30 \text{ seg}}{24 \text{ horas} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}}} = 0.000347$$

#### - Factor de simultaneidad

Existe un solo motor neumático en la planta de Máquina de Colada Continua.

$$F_s = 1$$

### 3.3.1.5. Ejemplo de cálculo de caudal real de aire para motor neumático en la Máquina de colada continua MCC.

Se determinó el caudal de aire comprimido considerando las condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil. Temperatura de aire libre  $T_{FAD}$  35 °C, presión de aire libre  $P_{FAD}$  1,013 bar, y humedad relativa HR 85%. (Guayaquil está a nivel del mar por lo que no se multiplica por un factor de altitud).

Para el cálculo se utilizó condiciones normales de acuerdo a CAGI (2016), temperatura en condiciones normales  $T_N$  20°C y presión en condiciones normales  $P_N$  1 bar, presión de saturación de agua  $P_v$  a 35 °C es 0,0563 bar.

El caudal requerido por el motor neumático a condiciones normales  $Q_N$  es 480  $Nm^3/h$  de acuerdo a las especificaciones del fabricante DANIELI, donde n es el número de unidades consumidoras. A continuación, se determina el caudal en condiciones ambientales locales.

$$Q_{CA} = \frac{Q_N \cdot T_{CA} \cdot P_N}{T_N \cdot \left( P_{FAD} - \frac{HR}{100} P_v \right)} * n \quad (\text{DIN 1343, 1990})$$

$$Q_{CA} = \frac{480 \frac{m^3}{h} \cdot (35^\circ\text{C} + 273) \cdot 1 \text{ bar}}{(20^\circ\text{C} + 273) \cdot \left(1,013 \text{ bar} - \frac{85}{100} \cdot 0,0563 \text{ bar}\right)} \cdot 1$$

$$Q_{CA} = 522.80 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para determinar el caudal real  $Q_R$  se multiplica por el factor de uso  $F_u$ , el factor de simultaneidad  $F_s$  y se añade un factor de 15% por fugas.

$$Q_R = F_u \cdot F_s \cdot F_{fugas} \cdot Q_{FAD} \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

$$Q_R = 3.47E - 4 \cdot 1 \cdot 1.15 \cdot 522.80 \frac{m^3}{h} = 0.209 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_R = 0.209 \frac{m^3}{h}$$

### 3.4. Calidad de aire comprimido para los principales consumidores de acuerdo a especificaciones del fabricante.

De acuerdo al fabricante DANIELI, se detalla las especificaciones de aire comprimido para servicio general y para el aire comprimido instrumental, la información se muestra en la Tabla 17 y Tabla 18 respectivamente.

**Tabla 17**  
*Especificaciones de aire para instrumentación.*

Especificaciones de aire instrumental	
Características	Aire seco y limpio
Presión mínima requerida	5 bar
Presión nominal	6 bar
Presión máxima	7 bar
Punto de rocío	5 °C bajo de la mínima temperatura ambiente en la presión de trabajo
Máximo contenido de aceite	1 ppm
Filtración	0,01 micron.

Fuente: (Fabricante DANIELI, 2018).

**Tabla 18***Especificaciones de aire comprimido para servicio general.*

<b>Especificaciones de aire comprimido de servicio general</b>	
Características	Aire seco y limpio
Presión mínima requerida	5 bar
Presión nominal	6 bar
Presión máxima	7 bar
Punto de rocío	5 °C bajo de la mínima temperatura ambiente en la presión de trabajo
Máximo contenido de aceite	3 ppm
Filtración	1 micron.

Fuente: (Fabricante DANIELI, 2018).

### 3.4.1. Casos especiales

El fabricante DANIELI recomienda ciertas especificaciones adicionales para la rampa de oxígeno del Horno eléctrico, y para el limpiador del filtro de mangas en la Planta de humos.

Ver Tabla 19 y Tabla 20.

#### 3.4.1.1. Rampa de oxígeno

**Tabla 19***Especificaciones de aire comprimido para la rampa de oxígeno.*

<b>Especificaciones de aire comprimido</b>	
Punto de rocío	5 °C bajo de la mínima temperatura ambiente en la presión de trabajo
Contenido de partículas	0.1 mg/m <sup>3</sup>
Máximo contenido de aceite	3 ppm
Filtración	0,01 μm
Presión	7 bar
Caudal instantánea por actuadores neumáticos	10 Nm <sup>3</sup> /h

Fuente: (Fabricante DANIELI, 2018).

#### 3.4.1.2. Limpieza de filtro de mangas

**Tabla 20***Especificación para aire comprimido para limpieza de filtro de mangas.*

<b>Especificaciones de aire para limpieza del filtro de mangas</b>	
Máxima contenido de aceite	-
Punto de rocío	+3°C debajo de la mínima temperatura ambiente
Contenido de partículas	-
Máximo contenido de aceite	0.02 mg/m <sup>3</sup>
Filtración	-

Fuente: (Fabricante DANIELI, 2018).

### **3.5. Selección del tipo de compresor**

La Tabla 12 indica que la demanda de aire comprimido de la Planta de Acería es de 2630,4  $m^3/h$  (1548,2 cfm) y de acuerdo a las Tablas 13, 14, 15 y 16 la presión que requieren los consumidores es menor a 125 psi por lo que el compresor de tipo Tornillo es adecuado para esta aplicación; su régimen de funcionamiento se encierra en color rojo en la Figura 6.

Las especificaciones de los compresores se indican en la Tabla 57 del apartado 4.2.1 del texto, todos estos equipos son adecuados, y pueden ser utilizados para el desarrollo de este proyecto.

### **3.6. Selección del tipo de secador**

El apartado 3.4. menciona la calidad de aire requerida por el sistema, donde especifica una presión de punto de rocío no menor a +3 °C; el caudal que requiere la Planta de Acería es de 2630,4  $m^3/h$  (1548,2 cfm), por lo que de acuerdo a la Tabla 4 del apartado 2.3.3.4 el secador de tipo refrigerativo tiene la capacidad de operar en este régimen. En la Tabla 39 del apartado 4.2.2 se detalla las especificaciones de los secadores para el desarrollo del sistema.

### **3.7. Detalle de funcionamiento de cuarto de compresores**

#### **3.7.1. Selección de sistema de control de compresores**

El cuarto de compresores está planificado para que funcione mediante un control por cascada, con opción a modificaciones para que pueda incluir un control por gama de presión utilizando un secuenciador.

#### **3.7.2. Detalle del funcionamiento del cuarto de compresores**

Para que el sistema pueda funcionar mediante un control por cascada los ocho compresores disponibles en la Planta de Acería de Andec S.A., deben ser separados en dos grupos de cuatro.



De acuerdo a los fabricantes para que no exista una caída de presión significativa y baja eficiencia se debe conectar un máximo de cuatro compresores por grupo.

Para planificar un cuarto de generación de aire comprimido se recomienda la combinación de compresores de potencias diferentes que armonicen entre sí, es decir, esta combinación se realiza entre compresores grandes que soportan la carga base y máquinas más pequeñas que llevan la carga punta. (Kaeser, 2010).

Cada grupo de compresores se formó considerando el número de horas de funcionamiento de cada equipo y el caudal máximo que suministra, cada grupo tiene similar capacidad de generación de aire comprimido. La Tabla 21 y Tabla 22 muestran los compresores del Primer Grupo y Segundo Grupo respectivamente.

**Tabla 21**

*Detalle de compresores que conforman primer grupo.*

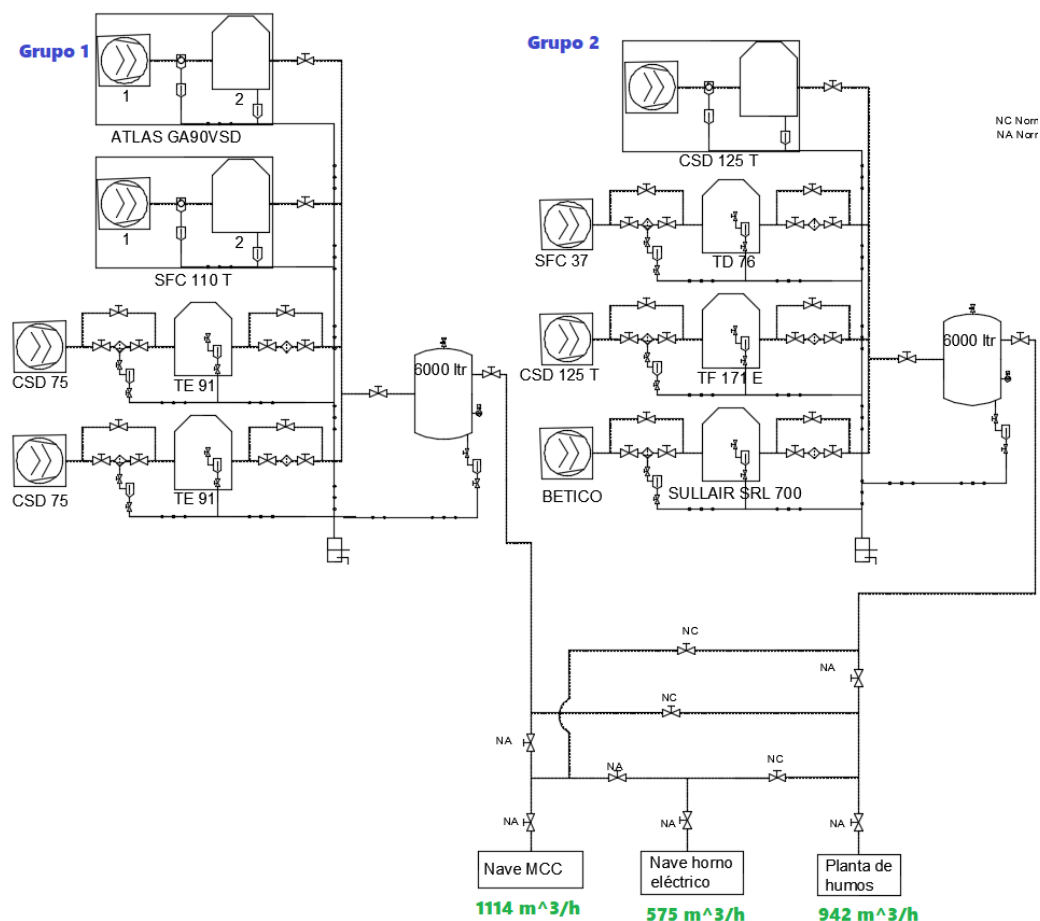
<b>Compresor</b>	<b>Caudal <math>m^3/h</math></b>	<b>Horas de trabajo</b>	<b>Inicio de operación</b>
Kaeser CSD75	586 $m^3/h$ (345 cfm)	18200	2013
Kaeser CSD 75	586 $m^3/h$ (345 cfm)	17500	2013
SFC 110T	1175 $m^3/h$ (692 cfm)	45231	2009
Atlas Copco GA90VSD	958 $m^3/h$ (564 cfm)	35000	2006

**Tabla 22**

*Detalle de compresores que conforman segundo grupo.*

<b>Compresor</b>	<b>Caudal <math>m^3/h</math></b>	<b>Horas de trabajo</b>	<b>Inicio de operación</b>
Kaeser SFC 37	92 -411 $m^3/h$ (54 - 242 cfm)	39100	2007
Kaeser CSD125	963 $m^3/h$ (567 cfm)	9000	2013
Betico ER 110	510 $m^3/h$ (300 cfm)	50210	2009
Kaeser CSD125 T	962 $m^3/h$ (566 cfm)	33000	2012

La Figura 30 muestra el esquema del sistema de válvulas que permite direccionar el flujo de aire comprimido a las tres áreas de acuerdo a la necesidad ya sea por causa de averías o trabajos de mantenimiento.



**Figura 30** Diagrama de cuarto de compresores del sistema, compuesto de dos grupos de cuatro compresores, dos tanques de almacenamiento y un sistema de válvulas que permite direccionar el flujo a las tres áreas consumidoras de acuerdo a la necesidad.

La Tabla 23 detalla cuatro combinaciones que se pueden realizar para el funcionamiento del sistema, indicando los compresores que se encuentran en carga base y carga pico. Además indica que las tres áreas de la Planta de Acería no pueden ser alimentadas por un solo grupo de compresores, se puede modificar el sistema de válvulas para que el Primer grupo y el Segundo Grupo de compresores suministren aire a cualquier área de acuerdo a la necesidad, sin embargo, para reducir el número de compresores encendidos la Planta de Humos y la Nave de la MCC

no deben ser alimentadas por un mismo grupo de compresores a la vez, de acuerdo a las condiciones establecidas cabe recalcar que la nave del Horno eléctrico siempre debe ir combinada con alguna de las otras dos áreas. Los compresores Atlas Copco GA90VSD y Kaeser CSD 125 T están considerados como equipos de Back up, estos servirán para cubrir la carga base cuando se realice trabajo de mantenimiento en los compresores Kaeser SFC110T y Kaeser CSD 125.

**Tabla 23**

*Compresores de carga base y carga pico, para Grupo 1 y Grupo 2, para las cuatro combinaciones analizadas.*

		Área
Caso 1	<b>Grupo 1</b> Carga base: SFC 110 ST Carga pico: CSD 75	Nave MCC y Nave de Horno
	<b>Grupo 2</b> Carga base: CSD 125 Carga pico: -	Planta de humos
Caso 2	<b>Grupo 1</b> Carga base: SFC 110 ST Carga pico: -	Nave MCC
	<b>Grupo 2</b> Carga base: CSD 125 Carga pico: ER 110 y SFC 37	Planta de humos y Nave de Horno
Caso 3	<b>Grupo 1</b> Carga base: SFC 110 ST Carga pico: -	Planta de Humos
	<b>Grupo 2</b> Carga base: CSD 125 Carga pico: ER 110 y SFC 37	Nave MCC y Nave de Horno
Caso 4	<b>Grupo 1</b> Carga base: SFC 110 ST Carga pico: CSD 75	Planta de humos y Nave de Horno
	<b>Grupo 2</b> Carga base: CSD 125 Carga pico: SFC 37	Nave MCC

### 3.8. Diseño de la red de tubería de aire comprimido

Para seleccionar los elementos del sistema de aire comprimido se utilizan matrices de selección para las cuales se realiza una ponderación de 1 a 5, donde 5 es Muy alto, 4 Alto, 3 Medio, 2

Regular y 1 Bajo; además se evalúa cuan imprescindible es el parámetro que se compara, la ponderación se realiza de 1 a 10, tal que 1 sea nada imprescindible y 10 realmente imprescindible.

### 3.8.1. Selección de configuración de red de aire comprimido.

La selección de la configuración de la red se realiza según el tipo de circuito y número de estaciones generadoras de aire comprimido.

#### 3.8.1.1. Según el tipo de circuito

El circuito de la red de aire comprimido adecuado para la Nave de Horno Eléctrico y la Nave de la MCC es un anillo cerrado, seleccionado de acuerdo a los parámetros evaluados en la Tabla 24; para la Planta de Humos por su localización y disposición de las unidades consumidoras se selecciona un circuito abierto. La configuración de la red se observa en el Layout mostrado en la Figura 32.

**Tabla 24**

*Cuadro de selección de tipo de circuito de tubería para Nave de Horno Eléctrico y Nave MCC.*

	Ponderación	Circuito abierto	Subtotal.	Circuito cerrado	Subtotal
<b>Ahorro en inversión inicial</b>	9	4	36	2	18
<b>Facilidad de mantenimiento</b>	9	2	18	4	36
<b>Eficiencia de circuito respecto a caída de presión</b>	10	3	30	4	40
		<b>Total</b>	<b>84</b>		<b>94</b>

#### 3.8.1.2. Según el número de estaciones generadoras de aire comprimido

El sistema seleccionado posee un solo cuarto de generación de aire comprimido centralizado. En el cuarto de compresores existe un sistema de válvulas que direcciona el flujo a los anillos de cada área de acuerdo a la necesidad del momento. La selección se realizó mediante la Tabla 25; en el Layout de la Figura 31 se muestra la ubicación del cuarto de compresores en la planta.

**Tabla 25**

*Cuadro de selección de número de estaciones generadoras de aire comprimido.*

	Ponderación	Sistema centralizado				Sistema descentralizado			
		Anillos independientes	Subt.	Anillos interconectados	Subt.	Anillos independientes	Subt.	Anillos interconectados	Subt.
Eficiencia de consumo de energía	10	2	20	4	40	2	20	3	30
Aprovechamiento de capacidad instalada	9	2	18	4	36	2	18	3	27
Facilidad de operación por control en cascada	10	4	40	4	40	4	40	1	10
Facilidad de Mantenimiento	9	3	27	4	36	2	18	3	27
Confiabilidad y Disponibilidad del sistema	10	3	30	4	40	3	30	4	40
Facilidad de medir la demanda por anillo	6	5	30	4	24	5	30	1	6
Ahorro en materiales	7	2	14	2	14	4	28	3	21
Eficiencia de la configuración de la red tubería	9	3	27	3	27	4	36	2	18
		<b>Total</b>	206		<b>257</b>		220		179

### 3.8.2. Selección de material de tubería

La Tabla 26 detalla los parámetros utilizados para evaluar la selección del material para la tubería de la red, entre los materiales analizados están el acero inoxidable, el acero negro, el cobre y el aluminio. El material más adecuado para ser implementado en la red es acero inoxidable de acuerdo a los valores del cuadro de selección, sin embargo, se seleccionó acero negro por ser un material más económico a pesar de que es susceptible a la corrosión y su tiempo de vida es menor al acero inoxidable.

**Tabla 26**  
*Cuadro de selección de materiales para tubería*

Característica de tubería	P.	Acero inox. CED 10	Sub tot	Acero Negro CED 40	Sub tot	Cobre	Sub tot	Alum.	Sub tot
Ligereza	3	3	9	2	6	4	12	4	12
Resistencia a la corrosión	8	5	40	1	8	5	40	5	40
Invulnerabilidad a pérdida de presión por fricción	8	4	32	2	16	4	32	4	32
Resistencia mecánica	7	5	35	5	35	2	14	2	14
Facilidad de instalar	6	3	18	2	12	4	24	4	24
Ahorro en inversión para material	10	3	30	5	50	1	10	1	10
Ahorro en inversión mano de obra	10	2	20	3	30	2	20	4	40
Calidad de aire	7	4	28	2	14	4	28	4	28
Disponibilidad de diámetros requeridos en el mercado	10	5	50	5	50	2	20	2	20
		<b>Total</b>	262		221		200		220

### 3.8.3. Dimensionamiento de la red de tubería

Para el dimensionamiento del diámetro de la tubería de la red de distribución de la Nave de Máquina de Colada Continua y Nave de Horno Eléctrico, se compara la caída de presión como un anillo cerrado y un anillo abierto; para la Planta de humos solamente se considera como una red abierta debido a la ubicación de los de consumidores en esa área; este análisis también incluye la caída de presión considerando un 20% de ampliación recomendado por Carnicer (1994).

Para obtener la longitud de la tubería primero se realizó un trazado preliminar de la red en la planta, además se enlistó el número de accesorios necesarios para la red de distribución de aire para cada área, el cálculo de la longitud equivalente aproximado para los accesorios se realizó a través de la Tabla 10 y se detalla en el Anexo I.

#### 3.8.3.1. Ejemplo de cálculo para tubería de $\varnothing 4$ pulgadas en Anillo MCC

Para calcular la caída de presión en redes de aire comprimido se utilizó las siguientes fórmulas:

$$\Delta p = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{V^2}{D} \cdot L \cdot p \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión (bar),  $p$  presión (bar),  $R$  constante de gas para aire equivale a 29,27 para el aire,  $D$  Diámetro interior de temperatura (mm),  $T$  Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $L$  longitud de tubería (m),  $V$  velocidad del aire (m/s),  $\beta$  Índice de resistencia (Grado medio de rugosidad),  $G$  cantidad de aire suministrado en kg/hora.

$$\Delta p = \frac{1.6 \cdot 10^3 \cdot Q^{1.85} \cdot L}{d^5 \cdot P} \quad (\text{Majumdar, 1998})$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión (Pa),  $L$  longitud de tubería (m),  $Q$  caudal del aire ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $d$  diámetro interior del tubo (m), presión absoluta del aire en la entrada del tubo (Pa).

#### Datos:

Caudal de aire  $Q$ :  $1114,2 \text{ m}^3/\text{h} \approx 18,57 \text{ m}^3/\text{min} \approx 0,31 \text{ m}^3/\text{s}$

Longitud de tubería de anillo  $L_{TUB}$ : 377 m.

Longitud equivalente aproximada  $L_E$  para accesorios en anillo nave MCC: 104,5 m (Ver Anexo H).

Temperatura máxima ambiental de Guayaquil: 35°C.

Ejemplo de cálculo como anillo abierto en Nave MCC

Entonces primero se debe conocer la longitud total ( $L_T$ ) para el anillo, longitud de tubería ( $L_{TUB}$ ) más la longitud equivalente aproximada para accesorios ( $L_E$ ).

$$L_T = L_{TUB} + L_E$$

$$L_T = 377 \text{ m} + 104,5 \text{ m} = 481,5 \text{ m}$$

Para realizar el cálculo de acuerdo a la fórmula tomada de Carnicer (1994), se calcula la velocidad del fluido.

$$V = \frac{\text{Caudal} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)}{60 \cdot \text{Presión}(\text{bar})} \cdot \frac{1000}{\text{Sección del tubo} (\text{cm}^2)} \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

$$V = \frac{18,57 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{60 (8 \text{ bar})} \cdot \frac{10000}{\left( \frac{\pi \cdot \left( \frac{4 \text{ in}}{1 \text{ in}} \cdot 2,54 \text{ cm} \right)^2}{4} \right)}$$

$$V = 4,77 \text{ m/s}$$

Se calcula la cantidad de aire suministrado  $G$  en kg/hora. El cálculo se lo realiza a una temperatura de 35°C donde densidad del aire  $\rho_{35^\circ\text{C}}$  es  $1,145 \text{ kg/m}^3$ .

$$G = \rho_{35^\circ\text{C}} \cdot Q \cdot 60 \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

$$G = 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left( 18,57 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \cdot 60 = 1275,76 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

A partir de la Tabla 77 conocido el valor de la cantidad de aire suministrado se interpola el valor de índice de resistencia  $\beta$ .



$$\beta = 1,00$$

Se aplica la fórmula obtenida de Carnicer (1994).

$$\Delta p = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{V^2}{D} \cdot L \cdot \dots \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

$$\Delta p = \frac{1,00}{(29,27)(35^\circ\text{C} + 273)} \cdot \frac{\left(4,77 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(4 \cdot 25,4 \text{ mm})} \cdot 481,5 \text{ m} \cdot 8 \text{ bar} = 0,095 \text{ bar}$$

La caída de presión de acuerdo la fórmula obtenida de Majumdar (1998).

$$\Delta p = \frac{1.6 \cdot 10^3 \cdot Q^{1.85} \cdot L}{d^5 \cdot P}$$

$$\Delta p = \frac{1.6 \cdot 10^3 \cdot \left(0,31 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^{1.85} \cdot 481,5}{(4 \cdot 0,0254 \text{ m})^5 \cdot (8 \cdot 10^5 \text{ Pa})} = 10190,1 \text{ Pa} \approx 0,102 \text{ bar}$$

#### Ejemplo de cálculo como anillo cerrado en Nave MCC

En un anillo cerrado la mitad del caudal recorre la mitad de la longitud total del anillo. Se realiza el cálculo de igual manera para la fórmula obtenida de Carnicer (1994) y Majumdar (1998).

Longitud considerada para un anillo cerrado.

$$\frac{L_T}{2} = \frac{481,5 \text{ m}}{2} = 240,75 \text{ m}$$

Caudal considerado para un anillo cerrado.

$$Q/2 = 557,1 \text{ m}^3/\text{h} \approx 9,29 \text{ m}^3/\text{min} \approx 0,155 \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad del fluido.

$$V = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right)}{60 \cdot \text{Presión}(\text{bar})} \cdot \frac{1000}{\text{Sección del tubo} (\text{cm}^2)}$$

$$V = \frac{9,29 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{60 (8 \text{ bar})} \cdot \frac{10000}{\left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{4 \text{ in}}{1 \text{ in}} \cdot 2,54 \text{ cm}\right)^2}{4}\right)}$$

$$V = 2,39 \text{ m/s}$$

Se calcula la cantidad de aire suministrado  $G$  en kg/hora. El cálculo se lo realiza a una temperatura de  $35^\circ\text{C}$  donde la densidad del aire  $\rho_{35^\circ\text{C}}$  es  $1,145 \text{ kg/m}^3$ .

$$G = \rho_{35^\circ\text{C}} \cdot Q \cdot 60 \quad (\text{Carnicer, 1994})$$

$$G = 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(9,29 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right) \cdot 60 = 638,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

A partir de la Tabla 100 conocido el valor de la cantidad de aire suministrado se interpola el valor de índice de resistencia  $\beta$ .

$$\beta = 1,10$$

Se aplica la fórmula obtenida de Carnicer (1994).

$$\Delta p = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{V^2}{D} \cdot L \cdot p$$

$$\Delta p = \frac{1,10}{(29,27)(35^\circ\text{C} + 273)} \cdot \frac{\left(2,39 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(4 \cdot 25,4 \text{ mm})} \cdot 240,75 \text{ m} \cdot 8 \text{ bar} = 0,013 \text{ bar}$$

La caída de presión de acuerdo la fórmula obtenida de Majumdar (1998).

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{d^5 \cdot P}$$

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot \left(0,155 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^{1,85} \cdot 240,75}{(4 \cdot 0,0254 \text{ m})^5 \cdot (8 \cdot 10^5 \text{ Pa})} = 1413,32 \text{ Pa} \approx 0,014 \text{ bar}$$

De los resultados se observa que para un anillo cerrado la caída de presión es menor en comparación a un anillo abierto, si se considera el mismo diámetro de tubería para ambos casos.

### 3.8.3.2. Red de distribución para Nave de Máquina de Colada Continua

En la Tabla 27, 28, 29 y 30, “A” es el resultado de caída de presión por medio de la fórmula tomada de Carnicer (1994), mientras que “B” indica el resultado de la fórmula de Majumdar (1998), estas fórmulas se encuentran descritas en el ejemplo de cálculo anterior. Para este

cálculo se considera una longitud equivalente aproximada para accesorios realizada a partir de la Tabla 10 y detallada en el Anexo H.

En la Tabla 27, 28, 29 y 30, se toma como anillo abierto el tramo de red de tubería que va desde el cuarto de compresores hasta la Nave de Máquina de Colada Continua. En las Tablas 28 y 30, se utiliza un factor de ampliación del 10%. Para seleccionar el diámetro de tubería se toma como referencia la recomendación de Atlas Copco (2011), que menciona que la caída de presión máxima es 0,05 bar (0,725 psi) para la tubería de distribución, y Carnicer (1994) que sugiere que la velocidad en tuberías de distribución de aire comprimido no supere los 8 m/s.

En la Tabla 27 el cálculo se realiza sin incluir un factor de ampliación y se considera a la red de la Nave MCC como un anillo cerrado, para este caso la tubería adecuada es de 4 pulgadas.

**Tabla 27**

*Caída de presión para anillo cerrado de Nave MCC, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada, pero no factor de ampliación</b>							
		<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo cerrado</b>			
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave MCC (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave MCC (bar)</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave MCC (bar)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
2	0,886	1,000	0,422	0,451	1,309	1,451	
2,5	0,290	0,328	0,138	0,148	0,429	0,475	
3	0,117	0,132	0,056	0,059	0,172	0,191	
<b>4</b>	<b>0,028</b>	<b>0,031</b>	<b>0,013</b>	<b>0,014</b>	<b>0,041</b>	<b>0,045</b>	
5	0,009	0,010	0,004	0,005	0,013	0,015	
6	0,004	0,004	0,002	0,002	0,005	0,006	

En la Tabla 28 el cálculo se realiza incluyendo un factor de ampliación de 10% y se calcula a la red de la Nave MCC como un anillo cerrado, para este caso la tubería adecuada es de 4 pulgadas.

**Tabla 28**

*Caída de presión para anillo cerrado de Nave MCC, incluyendo un factor de ampliación de 10% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada y factor de ampliación de 10%</b>						
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo cerrado</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave MCC (bar)</b>	
	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave MCC (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave MCC (bar)</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	1,040	1,193	0,505	0,538	1,545	1,731
2,5	0,341	0,391	0,165	0,176	0,506	0,567
3	0,137	0,157	0,067	0,071	0,203	0,228
4	0,032	0,037	0,016	0,017	0,048	0,054
5	0,011	0,012	0,005	0,006	0,016	0,018
6	0,004	0,005	0,002	0,002	0,006	0,007

En la Tabla 29 el cálculo se realiza sin incluir un factor de ampliación y se considera a la Nave MCC como anillo abierto, para este caso la tubería adecuada es de 5 in.

**Tabla 29**

*Caída de presión para anillo abierto de Nave MCC, sin incluir un factor de ampliación y considerando una longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada, pero no factor de ampliación</b>						
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo abierto</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave MCC (bar)</b>	
	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave MCC (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave MCC (bar)</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	0,886	1,000	3,055	3,251	3,941	4,251
2,5	0,290	0,328	1,001	1,065	1,292	1,393
3	0,117	0,132	0,402	0,428	0,519	0,560
4	0,028	0,031	0,095	0,102	0,123	0,133
5	0,009	0,010	0,031	0,033	0,040	0,044
6	0,004	0,004	0,013	0,013	0,016	0,017

En la Tabla 30 el cálculo se realiza incluyendo un factor de ampliación de 10% y se considera a la red de la Nave MCC como anillo abierto, para este caso la tubería adecuada es de 5 pulgadas.

**Tabla 30**

*Caída de presión para anillo abierto de Nave MCC, incluyendo un factor de ampliación de 10% y considerando una longitud equivalente aproximada para accesorios.*

Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada y factor de ampliación de 10%						
Diámetro de tubería (in)	Anillo abierto		Anillo abierto		Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave MCC (bar)	
	Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave MCC (bar)		Caída de presión anillo Nave MCC (bar)			
	A	B	A	B	A	B
2	1,040	1,193	3,622	3,878	4,661	5,071
2,5	0,341	0,391	1,187	1,271	1,527	1,662
3	0,137	0,157	0,477	0,511	0,614	0,668
4	0,032	0,037	0,113	0,121	0,146	0,158
5	0,011	0,012	0,037	0,040	0,048	0,052
6	0,004	0,005	0,015	0,016	0,019	0,021

La Tabla 31 indica las velocidades del fluido de varios diámetros para la red de la Nave MCC, sin considerar un factor de ampliación. De 2 ½ pulgadas de diámetro en adelante la velocidad del fluido no supera los 8 m/s para un anillo cerrado, mientras que de 4 pulgadas en adelante para un anillo abierto.

**Tabla 31**

*Velocidad de aire comprimido en tubería, para la red de la Nave MCC, para anillo cerrado y anillo abierto. Sin considerar un factor de ampliación.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Anillo cerrado	Anillo abierto
2	9,54	19,09
2,5	6,11	12,22
3	4,24	8,48
4	2,39	4,77
5	1,53	3,05
6	1,06	2,12

La Tabla 32 indica las velocidades del fluido para varios diámetros en la red de la Nave MCC, considerando un factor de ampliación de 10%. De 2 ½ pulgadas de diámetro en adelante la velocidad del fluido no supera los 8 m/s para un anillo cerrado, mientras que de 4 pulgadas en adelante para un anillo abierto.

**Tabla 32**

*Velocidad de aire comprimido en tubería, para la red de la Nave MCC, para anillo cerrado y anillo abierto. Considerando un factor de ampliación de 10%.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Anillo cerrado	Anillo abierto
2	11,45	21,00
2,5	7,33	13,44
3	5,09	9,33
4	2,86	5,25
5	1,83	3,36
6	1,27	2,33

La Tabla 33 indica las velocidades para varios diámetros del tramo de tubería que conecta el cuarto de compresores con el anillo de la Nave de MCC. A partir de la tubería de 4 pulgadas de diámetro la velocidad de fluido es menor tanto si se considera o no un factor de ampliación de 10%.

**Tabla 33**

*Velocidad de aire comprimido en tubería, para tramo desde cuarto de compresores hasta el anillo de la Nave MCC, considerando y no un factor de ampliación de 10%.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Sin factor de ampliación	Con factor de ampliación de 10%
2	19,09	21,00
2,5	12,22	13,44
3	8,48	9,33
4	4,77	5,25
5	3,05	3,36
6	2,12	2,33

Se selecciona la tubería de menor diámetro posible que cumpla con las recomendaciones tomadas como referencia; Carnicer (1994) sugiere que la velocidad del fluido para redes principales y secundarias no supere los 8 m/s y Atlas Copco (2011) menciona que la caída de presión no debe superar los 0,05 bar. A partir de los cálculos realizados se elige una tubería de 4 pulgadas para un anillo cerrado en la Nave MCC, considerando un factor de ampliación de 10%; donde la caída de presión obtenida según Carnicer (1994) es 0,048 bar y una velocidad de 2,86 m/s, mientras según Majumdar (1998) la caída de presión es 0,054 bar.

### **3.8.3.3. Red de distribución para Nave de Horno Eléctrico**

En la Tabla 31, 32, 33 y 34; “A” es la caída de presión calculada por medio de la fórmula obtenida de Carnicer (1994), mientras que “B” indica el resultado de la fórmula de Majumdar (1998), estas fórmulas se encuentran descritas en el ejemplo de cálculo anterior. Para este cálculo se considera una longitud equivalente aproximada para accesorios realizada a partir de la Tabla 10 y detallada en el Anexo H.

En la Tabla 31, 32, 33 y 34, el tramo de red de tubería que conecta el cuarto de compresores con el anillo de la Nave del Horno Eléctrico se calcula como anillo abierto. En las Tablas 32 y 34, se utiliza un factor de ampliación del 20% de acuerdo a la recomendación de Carnicer (1994). Atlas Copco (2011), recomienda una caída de presión máxima para tuberías de distribución de 0,05 bar (0,725 psi).

En la Tabla 34 se considera la Nave de Horno como un anillo cerrado, sin incluir un factor de ampliación, para este caso la tubería de 3 pulgadas es la más adecuada.

**Tabla 34**

*Caída de presión para anillo cerrado de Nave Horno, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada, pero no factor de ampliación.</b>							
		<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo cerrado</b>			
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave Horno (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave Horno (bar)</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave del Horno (bar)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
2	0,025	0,028	0,134	0,143	0,159	0,170	
2,5	0,008	0,009	0,044	0,047	0,052	0,056	
3	0,003	0,004	0,018	0,019	0,021	0,022	
4	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005	
5	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	
6	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	

La Tabla 35 contiene la caída de presión para varios diámetros, considerando a la Nave de Horno como un anillo cerrado e incluyendo un factor de ampliación de 20%, para este caso la tubería de 3 pulgadas es la más adecuada.

**Tabla 35**

*Caída de presión para anillo cerrado de Nave Horno, incluyendo factor de ampliación de 20% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada y factor de ampliación de 20%.</b>							
		<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo cerrado</b>			
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave Horno (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave Horno (bar)</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave del Horno (bar)</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
2	0,039	0,039	0,187	0,200	0,225	0,238	
2,5	0,013	0,013	0,061	0,065	0,074	0,078	
3	0,005	0,005	0,025	0,026	0,030	0,031	
4	0,001	0,001	0,006	0,006	0,007	0,007	
5	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	
6	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	



La Tabla 36 contiene la caída de presión para varios diámetros, considerando a la Nave de Horno como un anillo abierto y sin incluir un factor de ampliación, para este caso la tubería de 4 pulgadas es la más adecuada.

**Tabla 36**

*Caída de presión para anillo abierto de Nave Horno, sin incluir factor de ampliación y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada, pero no factor de ampliación.</b>						
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo abierto</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave del Horno (bar)</b>	
	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave Horno (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave Horno (bar)</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	0,025	0,028	0,964	1,028	0,989	1,056
2,5	0,008	0,009	0,316	0,337	0,324	0,346
3	0,003	0,004	0,127	0,135	0,130	0,139
4	0,001	0,001	0,030	0,032	0,031	0,033
5	0,000	0,000	0,010	0,011	0,010	0,011
6	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004

**Tabla 37**

*Caída de presión para anillo abierto de Nave Horno, incluyendo factor de ampliación de 20% y considerando longitud equivalente aproximada para accesorios.*

<b>Caída de presión considerando longitud equivalente aproximada y factor de ampliación de 20%.</b>						
<b>Diámetro de tubería (in)</b>	<b>Anillo abierto</b>		<b>Anillo abierto</b>		<b>Total de caída de presión en tubería de distribución para la Nave del Horno (bar)</b>	
	<b>Caída de presión Tramo C. de compresores-Anillo de Nave Horno (bar)</b>		<b>Caída de presión anillo Nave Horno (bar)</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	0,036	0,039	1,354	1,440	1,390	1,479
2,5	0,012	0,013	0,444	0,472	0,456	0,485
3	0,005	0,005	0,178	0,190	0,183	0,195
4	0,001	0,001	0,042	0,045	0,043	0,046
5	0,000	0,000	0,014	0,015	0,014	0,015
6	0,000	0,000	0,006	0,006	0,006	0,006

La Tabla 37 contiene la caída de presión para varios diámetros, considerando a la Nave de Horno como un anillo abierto e incluyendo un factor de ampliación de 20%, para este caso la tubería de 4 pulgadas es la más adecuada.

La Tabla 38 muestra la velocidad de aire comprimido para un anillo cerrado y abierto en la Nave del Horno, sin utilizar un factor de ampliación. Para un anillo cerrado la velocidad de aire comprimido es superior a 8 m/s con tuberías mayores a 2in; para un anillo abierto la velocidad de aire comprimido es superior a 8 m/s con tuberías mayores a 2 ½ in.

**Tabla 38**

*Velocidad de aire comprimido en anillo de Nave de Horno sin utilizar factor de ampliación.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Anillo cerrado	Anillo abierto
2	4,92	9,84
2,5	3,15	6,30
3	2,19	4,37
4	1,23	2,46
5	0,79	1,57
6	0,55	1,09

La Tabla 39 muestra la velocidad de aire comprimido para un anillo cerrado y abierto en la Nave del Horno, utilizando un factor de ampliación de 20%. Para un anillo cerrado la velocidad de aire comprimido es superior a 8 m/s con tuberías mayores a 2in; para un anillo abierto la velocidad de aire comprimido es superior a 8 m/s con tuberías mayores a 2 ½ in.

**Tabla 39**

*Velocidad de aire comprimido en anillo de Nave de Horno utilizando un factor de ampliación de 20%.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Anillo cerrado	Anillo abierto
2	5,41	10,83
2,5	3,46	6,93
3	2,41	4,81
4	1,35	2,71
5	0,87	1,73
6	0,60	1,20

La Tabla 40 muestra las velocidades de aire comprimido para tramo desde cuarto de compresores hasta anillo de Nave de Horno, considerando y no un factor de 20% de ampliación, para obtener una velocidad menor a 8m/s se debe escoger una tubería de 2 ½ pulgadas o superior.

**Tabla 40**

*Velocidad de aire comprimido para tramo desde cuarto de compresores hasta anillo de Nave de Horno considerando y no un factor de ampliación de 20%.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Sin Factor de ampliación	Con Factor de ampliación
2	9,84	11,81
2,5	6,30	7,56
3	4,37	5,25
4	2,46	2,95
5	1,57	1,89
6	1,09	1,31

Se selecciona la tubería de menor diámetro que cumpla con las recomendaciones tomadas como referencia; Carnicer (1994) sugiere que la velocidad del fluido para redes principales y secundarias no supere los 8 m/s y Atlas Copco (2011) menciona que la caída de presión no debe superar los 0,05 bar. A partir de los cálculos realizados se elige una tubería de 3 pulgadas para un anillo cerrado en la Nave del Horno, considerando un factor de ampliación de 20%; donde la caída de presión obtenida según Carnicer (1994) es 0,030 bar y una velocidad de 2,41 m/s, mientras según Majumdar (1998) la caída de presión es 0,031 bar. Ver Tabla 35 y 39.

#### **3.8.3.4. Red de distribución hacia Planta de Humos**

En la Tabla 41 y 42; “A” es la caída de presión calculada por medio de la fórmula obtenida de Carnicer (1994), mientras que “B” indica el resultado de la fórmula de Majumdar (1998), estas fórmulas se encuentran descritas en el ejemplo de cálculo anterior. Para este cálculo se considera una longitud equivalente aproximada para accesorios realizada a partir de la Tabla

10 y detallada en el Anexo H. Para la planta de humos se considera la configuración de anillo abierto por la ubicación de los consumidores en esa área.

La Tabla 41 indica la caída de presión para la Red de Planta de Humos, sin considerar un factor de ampliación. El diámetro adecuado para este caso es 4 pulgadas.

**Tabla 41**

*Caída de presión para red de Planta de Humos, sin considerar un factor de ampliación.*

<b>Caída de presión, sin factor de ampliación (bar)</b>		
<b>Diámetro (in)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	0,853	0,909
2,5	0,279	0,298
3	0,112	0,120
4	0,027	0,028
5	0,009	0,009
6	0,004	0,004

La Tabla 42 indica la caída de presión para la Red de Planta de Humos, considerando un factor de ampliación de 10%. El diámetro adecuado para este caso es 4 pulgadas.

**Tabla 42**

*Caída de presión para red de Planta de Humos, considerando un factor de ampliación.*

<b>Caída de presión, con factor de ampliación (bar)</b>		
<b>Diámetro (in)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2	1,019	1,084
2,5	0,334	0,355
3	0,134	0,143
4	0,032	0,034
5	0,010	0,011
6	0,004	0,004

La Tabla 43 muestra las velocidades para la red de aire comprimido de la Planta de Humos, considerando y no un factor de ampliación de 10%, para ambos casos se obtiene velocidades menores a 8 m/s a partir de un diámetro de 3 pulgadas.

**Tabla 43**

*Velocidad de aire comprimido para Red de Planta de Humos, considerando y no un factor de ampliación de 10%.*

Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	
	Sin Factor de ampliación	Con Factor de ampliación
2	16,13	17,74
2,5	10,32	11,36
3	7,17	7,89
4	4,03	4,44
5	2,58	2,84
6	1,79	1,97

Se selecciona la tubería de menor diámetro que cumpla con las recomendaciones tomadas como referencia; Carnicer (1994) sugiere que la velocidad del fluido para redes principales y secundarias no supere los 8 m/s y Atlas Copco (2011) menciona que la caída de presión no debe superar los 0,05 bar. A partir de los cálculos realizados se elige una tubería de 4 pulgadas para un anillo abierto en la Planta de Humos, considerando un factor de ampliación de 10%; donde la caída de presión obtenida según Carnicer (1994) es 0,32 bar y una velocidad de 4,44 m/s, mientras según Majumdar (1998) la caída de presión es 0,034 bar. Ver Tabla 42 y 43.

### **3.8.4. Resumen de resultados de dimensionamiento de red de distribución de aire comprimido**

La Tabla 44 indica los diámetros seleccionados para la red de aire comprimido para la Nave de Horno Eléctrico, Nave de la Máquina de Colada Continua y la Planta de Humos de la Planta de Acería de Andec S.A.

**Tabla 44**

*Resumen de diámetros seleccionados para red de distribución de aire comprimido.*

Lugar	Elemento	Descripción
Nave de Horno Eléctrico	Anillo de Nave de Horno Eléctrico	Tubería de $\varnothing 3$
Nave MCC	Anillo de Nave de MCC	Tubería de $\varnothing 4$
Planta de Humos	Red de tubería	Tubería de $\varnothing 4$

### 3.8.5. Dimensionamiento de manifold principal

Para el diseño de la distribución de aire comprimido, los ocho compresores disponibles fueron organizados en dos grupos de cuatro, y se realizará un control por cascada, cada grupo dispone de un colector que conduce el aire suministrado por los compresores a un tanque de almacenamiento.

#### 3.8.5.1. Dimensionamiento de Manifold de Primer Grupo

$$Q_T = \sum \text{Caudales de compresores de primer Grupo}$$

$$Q_T = Q_{CSD75} + Q_{CSD75} + Q_{SFC110T} + Q_{GA90VSD}$$

$$Q_T = (586 + 586 + 1175 + 958) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_T = 3305 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx 55,08 \text{ m}^3/\text{min}$$

Se calcula la cantidad de aire suministrado G en kg/hora.

$$G = \rho_{35^\circ\text{C}} \cdot Q \cdot 60$$

$$G = 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left( 55,08 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \cdot 60 = 3784,23 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

A partir de la Tabla 100 conocido el valor de la cantidad de aire suministrado se interpola el valor de índice de resistencia  $\beta$ , siendo 0,85.

Se calcula la velocidad:

$$V = \frac{\text{Caudal} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)}{60 \cdot \text{Presión}(\text{bar})} \cdot \frac{1000}{\text{Sección del tubo} (\text{cm}^2)}$$

La Tabla 45 muestra velocidades de aire comprimido para diferentes diámetros de Manifold 1.

**Tabla 45**

*Velocidad de aire comprimido para Manifold 1, para diferentes diámetros.*

Diámetro (in)	Velocidad de fluido (m/s)
2	56,62
2,5	36,24
3	25,16
4	14,15
5	9,06
6	6,29

La Tabla 46 muestra la caída de presión de acuerdo a (Carnicer, 1994).

$$\Delta p = \frac{\beta}{RT} \cdot \frac{V^2}{D} \cdot L \cdot p$$

**Tabla 46**

*Caída de presión para Manifold 1.*

Diámetro (in)	Caída de presión (bar)
2	2,362
2,5	0,937
3	0,377
4	0,100
5	0,037
6	0,017

La velocidad del aire comprimido no debe exceder los 8 m/s (Carnicer, 1994). La caída de presión para el Manifold de 6 pulgadas es 0,17 bar.

### 3.8.5.2. Dimensionamiento de Manifold de Primer Grupo

Para dimensionar el Manifold es necesario conocer el caudal total del Grupo de compresores.

$$Q_T = Q_{SFC37} + Q_{CSD125} + Q_{ER110} + Q_{CSD125T}$$

$$Q_T = (411 + 963 + 510 + 962) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_T = 2846 \frac{m^3}{h} \approx 47,43 \text{ m}^3/\text{min}$$

Se calcula la cantidad de aire suministrado G en kg/hora.

$$G = \rho_{35^\circ C} \cdot Q \cdot 60$$

$$G = 1,145 \frac{kg}{m^3} \cdot \left( 47,43 \frac{m^3}{min} \right) \cdot 60 = 47,43 \frac{kg}{h}$$

A partir de la Tabla 100 conocido el valor de la cantidad de aire suministrado se interpola el valor de índice de resistencia  $\beta$ , siendo 0,81. Se calcula la velocidad:

$$V = \frac{\text{Caudal} \left( \frac{m^3}{min} \right)}{60 \cdot \text{Presión}(\text{bar})} \cdot \frac{1000}{\text{Sección del tubo} (cm^2)}$$

La Tabla 47 muestra velocidades de aire comprimido para diferentes diámetros de Manifold 2.

**Tabla 47**

*Velocidad de aire comprimido para varios diámetros Manifold 2.*

Diámetro (in)	Velocidad de fluido m/s
2	48,76
2,5	31,20
3	21,67
4	12,19
5	7,80
6	5,42

**Tabla 48**

*Caída de presión para diferentes diámetros de Manifold 2.*

Diámetro (in)	Caída de presión bar
2	1,312
2,5	0,546
3	0,219
4	0,059
5	0,023
6	0,010



Se selecciona para el Manifold 2 una tubería de 5 pulgadas con velocidad para el aire comprimido de 7,8 m/s y 0.023 bar de caída de presión.

### 3.8.5.3. Resumen de resultados de dimensionamiento de Manifold

**Tabla 49**

*Diámetro de Manifold para Grupo 1 y Grupo 2 de compresores.*

<b>Cuarto de compresores</b>	Colector de aire comprimido de Grupo 1 de compresores	Tubería de $\varnothing 6$ in – Acero negro
	Colector de aire comprimido de Grupo 2 de compresores	Tubería de $\varnothing 5$ in – Acero negro

### 3.8.6. Dimensionamiento de tanque de almacenamiento de cuarto de compresores

La memoria de dimensionamiento de los tanques de almacenamiento de cuarto de compresores se detalla en el Anexo J.

La Tabla 50 detalla las dimensiones de los tanques de cada grupo de compresores para cada una de las cuatro configuraciones planificadas para el funcionamiento del sistema (ver apartado 3.7.2. del texto). La dimensión de los tanques más alta es de  $5,856 m^3$  y  $5,865 m^3$  para el tanque 1 y 2 respectivamente, estos valores corresponden al cuarto caso en la que el Grupo 1 de compresores alimenta la Planta de Humos junto con la Nave del Horno y el Grupo 2 de compresores suministra aire a la Nave de MCC.

Se selecciona la dimensión de  $6 m^3$  tanto para el Tanque 1 como el Tanque 2 del cuarto de compresores, estos tanques servirán para los cuatro combinaciones con las que funcionará el sistema.

**Tabla 50**

*Resumen de resultados de dimensionamiento de tanque de aire comprimido para las cuatro configuraciones planificadas para el funcionamiento del sistema.*

	Descripción	Volumen tanque 1	Volumen tanque 2
<b>Caso 1</b>	Grupo 1: Nave MCC y Nave de Horno Grupo 2: Planta de humos	1,944 m <sup>3</sup>	0,581 m <sup>3</sup>
<b>Caso 2</b>	Grupo 1: Nave MCC Grupo 2: Planta de humos y Nave de Horno	1,621 m <sup>3</sup>	1,314 m <sup>3</sup>
<b>Caso 3</b>	Grupo 1: Planta de Humos Grupo 2: Nave MCC y Nave de Horno	5,195 m <sup>3</sup>	4,879 m <sup>3</sup>
<b>Caso 4</b>	Grupo 1: Planta de humos y Nave de Horno Grupo 2: Nave MCC	5,856 m <sup>3</sup>	5,865 m <sup>3</sup>

### 3.8.7. Selección de filtros

De acuerdo a la Figura 35 del ANEXO C la calidad de aire comprimido estándar para el sistema corresponde al nivel 3, esto indica que es necesario instalar un filtro KFS que remueve el 99% de líquidos de agua y un filtro KOR que remueve el 99% de líquidos de aceite, estos filtros no son seleccionados en función de su diámetro sino de acuerdo al flujo y presión de operación.

La Tabla 88 del Anexo C detalla el caudal de servicio del filtro para una presión de 100 psi (6,89 bar), el sistema de aire comprimido tiene una capacidad de 125 psi (8,61 bar) por lo que de acuerdo a Kaeser (2005) es necesario multiplicar el flujo nominal por un factor de corrección.

**Tabla 51**

*Factor de corrección de filtros de acuerdo a la presión de operación.*

Presión mínima de admisión (psi)	20	30	40	60	80	100	120	150	200	250
Factor de corrección	0,30	0,39	0,48	0,65	0,82	1,00	1,17	1,43	1,87	2,31

Fuente: (Kaeser, 2005).

El factor de corrección interpolado de la Tabla 51 para una presión de 125 psi (8,61 bar) es de 1,21. Este factor se multiplica por el flujo nominal de servicio del filtro detallado en la Tabla 88 del Anexo C.

De acuerdo al caudal para los compresores Kaeser CSD 75, Betico ER110 y Kaeser SFC37, se debe instalar un filtro KFS 375 antes del secador y KOR 375 después del secador. Para el compresor Kaeser CSD125 es necesario un filtro KFS 485.2.5 antes del secador y un filtro KOR 485.2.5 después del secador.

### 3.8.8. Selección de drenaje de condensado

El equipo para realizar el drenaje de condensado es seleccionado de acuerdo la presión mínima y máxima, la zona climática, y el caudal máximo. En la Tabla 52 se detalla la selección del equipo para cada elemento del sistema. En la Tabla 89 del Anexo C se muestra el catálogo a partir del cual se realizó la selección.

**Tabla 52**

*Drenaje de condensado seleccionado para cada elemento del sistema.*

Elemento	Drenaje de condensado seleccionado
Filtro KOR 375, KFS 375, KOR 485.2.5, KFS 485.2.5	Ecodrain 30
Tanque de almacenamiento 1 y 2 de cuarto de compresores.	Ecodrain 13

### 3.8.9. Selección de equipo para tratamiento de condensados

El equipo para tratamiento de condensado se selecciona en base al caudal máximo suministrado por los compresores. Para el sistema de aire comprimido se elige dos unidades AQUAMAT CF 38. En la Tabla 90 del Anexo C se detalla las especificaciones del fabricante a partir del cual se seleccionó el equipo.

### 3.8.10. Disposición de equipos en cuarto de compresores

En el cuarto de compresores la disposición de los equipos seleccionada es Compresor – Filtro KFS – Secador – Filtro KOR – Tanque pulmón, para el sistema cada compresor dispone de un secador refrigerativo, cuya descarga está conectada al Manifold mismo que conduce el aire

comprimido al Tanque pulmón y este a la red principal. En el diseño no se consideró un “Tanque Húmedo” por cuestiones de espacio y presupuesto. En la Tabla 53 se indica el secador que va conectado a cada compresor, también se indica el filtro KOR y KFS que le corresponde, esta selección se la realiza de acuerdo al caudal del compresor que detalla la Tabla 21 y 22.

**Tabla 53**

*Secador, Filtro KFS y Filtro KOR correspondiente a cada compresor del sistema.*

Compresor	Secador	Filtro KOR	Filtro KFS
Kaeser CSD75	TE 91	KOR 375	KFS 375
Kaeser CSD 75	TE 91	KOR 375	KFS 375
Kaeser SFC 37	Kaeser TD76	KOR 375	KFS 375
Kaeser CSD125	Kaeser TF171E	KOR 485.2.5	KFS 485.2.5
Betico ER 110	Sullair SRL 700	KOR 375	KFS 375

Los compresores Kaeser CSD125 T, Atlas Copco GA90VSD y Kaeser SFC 110 ST, incluyen un secador refrigerativo por lo que no se les incluyo en este análisis.

### 3.8.11. Cálculo de caída de presión

La Tabla 54 muestra la caída de presión para los componentes del sistema de aire comprimido de acuerdo al catálogo del fabricante.

**Tabla 54**

*Caída de presión para cada uno de los componentes del cuarto de generación de aire comprimido.*

Componente	Caída de presión
Filtro KFS	Seco: 1 psi (0,07 bar) Mojado: 1,5 psi (0,1 bar)
Secador refrigerativo	2,5 psi (0,17 bar)
Filtro KOR	Seco: 1 psi (0,07 bar) Mojado: 3psi (0,21 bar)

Fuente: (Fabricante Kaeser, 2018)

El cálculo detallado de la caída de presión para Manifold y Tubería de descarga de cuarto de compresores se detalla en el Anexo L. La caída de presión para los dos Manifold del sistema se muestran en la Tabla 55.

**Tabla 55**

*Caída de presión de Manifold y tubería de descarga en cuarto de compresores.*

Componente	Diámetro	Caída de presión
Manifold 1	Ø6"	0,017 bar (0,58 psi)
Manifold 2	Ø5"	0,023 bar (0,29 psi)
Tubería de descarga	Ø2"	0,056 bar (0,823 psi)
Tubería de descarga	Ø3"	0,037 bar (0,543 psi)

El cálculo detallado para la pérdida de presión para red de tubería se encuentra en el Anexo L, la caída de presión en la red principal de aire comprimido se muestra en la Tabla 56.

**Tabla 56**

*Caída de presión en red principal del sistema.*

Sitio	Diámetro interior de tubería	Pérdida de presión
Red Planta de humos	Ø4"	0,20 bar (2,9 psi)
Anillo MCC	Ø4"	0,31 bar (4,5 psi)
Anillo de horno	Ø3"	0,23 bar (3,34 psi)

### 3.8.11.1. Pérdida de presión al punto más lejano de cada área.

Para analizar la pérdida de presión al punto más lejano consideramos la disposición de los equipos en el sistema, en el cuarto de compresores es Filtro KFS, Secador refrigerativo, Filtro KOR, tubería de descarga, Manifold, red principal correspondiente a cada área.

**Tabla 57**  
*Pérdida de presión al punto más lejano de cada área.*

<b>Red Elemnts</b>	<b>Planta de humos</b>	<b>Nave MCC</b>	<b>Nave Horno Eléctrico</b>
Filtro KFS	0,1 bar (1,5 psi)	0,1 bar (1,5 psi)	0,1 bar (1,5 psi)
Secador refrigerativo	0,17 bar (2,5 psi)	0,17 bar (2,5 psi)	0,17 bar (2,5 psi)
Filtro KOR	0,21 bar (3 psi)	0,21 bar (3 psi)	0,21 bar (3 psi)
Tubería de descarga Ø2"	0,056 bar (0,823 psi)	0,056 bar (0,823 psi)	0,056 bar (0,823 psi)
Manifold	0,017 bar (0,249 psi)	0,017 bar (0,249 psi)	0,017 bar (0,249 psi)
Red principal de área	0,030 bar (0,441 psi)	0,048 bar (0,706 psi)	0,032 bar (0,470 psi)
<b>Total</b>	0,583 bar (8,570 psi)	0,601 bar (8,835 psi)	0,585 bar (8,599 psi)

Para este análisis se considera los circuitos de elementos del sistema más críticos, es decir, los que presentan mayor pérdida de presión. La pérdida de presión del sistema respecto a la presión de descarga de los compresores representa el 6,85 % para la Planta de Humos, 7,06% para la Nave MCC y 6,87% para la Nave del Horno, para el caso más crítico. Ver Tabla 57.

### 3.9. Cálculo de condensado de aire comprimido

Este cálculo es aproximado, se toman eficacias ideales y temperaturas de salida de aire redondeadas (tomadas durante el mantenimiento preventivo de los equipos).

Para el cálculo de condensados en cada punto de un sistema de aire comprimido se realiza a partir de los siguientes datos (Carnicer,1994):

*En la línea de aire:*

- Humedad absoluta  $h_{ab}$ , en g/kg
- Humedad de saturación  $h_s$ , en g/kg
- Humedad relativa  $h_r$ , %
- Punto de rocío a presión de servicio,  $T_r$ , °C
- Arrastres líquidos ,  $A'$ , en g/kg.
- Arrastres líquidos A, en l/h.
- Porcentaje de humedad sobre la inicial de aspiración w, %
- Porcentaje de arrastres líquidos sobre la humedad inicial de aspiración a, %

*Para los condensados que se eliminan*

- Cantidad de separados  $L'$ , g/Kg
- Cantidad de separados  $L'$ , l/h
- Porcentaje de condensados separados a la humedad inicial de aspiración l, en %.

#### 3.9.1. Ejemplo de cálculo de condensado.

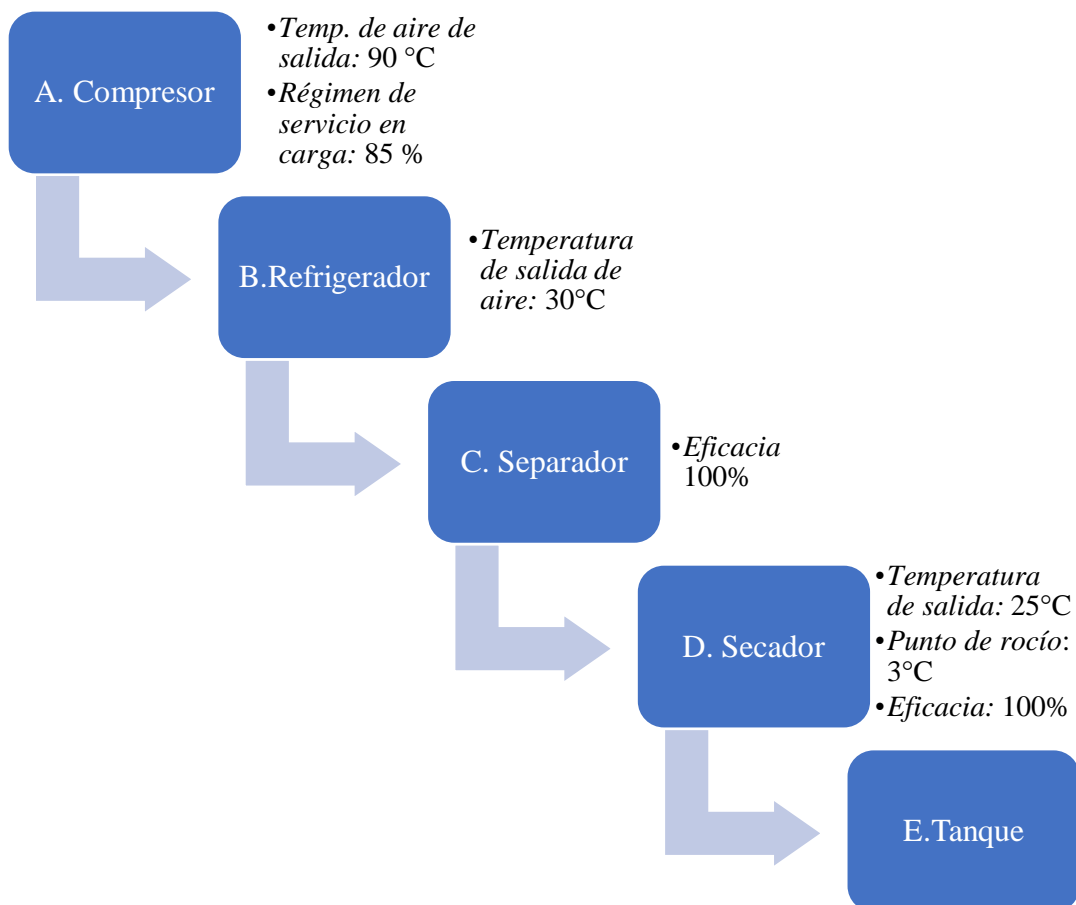
Se calcula la cantidad de condensado retirado para cada grupo compresor-refrigerador-separador-secador que incluye el sistema, considerando las mismas consideraciones iniciales para cada uno de ellos.

Condiciones ambientales

Humedad relativa 85 %  
 Temperatura 35 °C  
 $P_{atm}$  1 atm

Consideraciones iniciales

Los datos de temperatura de salida de aire se obtuvieron de hojas de datos de mantenimiento, realizadas en la empresa ANDEC S.A., estos valores fueron redondeados.



**Figura 31** Disposición de los equipos en el sistema de cuarto de compresores y consideraciones iniciales para el cálculo de condensado.

Ejemplo de cálculo para compresor Kaeser SFC 37 y secador Kaeser TD 76.

Caudal de compresor SFC 37: 6,85 m<sup>3</sup>/min

**Etapas 1: Condiciones de admisión de aire.**

$$h_{s1} = 36,6 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \text{ a } 35^{\circ}C \text{ Tomado de Tabla 1 ATA (Carnicer, 1994)}$$



$$h_1 = 0,85 \cdot 36,6 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} = 31,11 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

$$T_{r1} = 32,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W_1 = 100\%$$

### **Etapas 2: Salida de compresor a refrigerador.**

$$h_{s2} = 58,97 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \quad \text{a } 90^\circ\text{C Tomado de Tabla 8 ATA (Carnicer, 1994)}$$

$$h_{ab2} = 36,6 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \quad \text{misma que la admisión}$$

$$h_{r2} = \frac{36,6}{58,97} \cdot 100 = 0,61\%$$

Temperatura en la que 36,6 g/kg saturan el ambiente

$$T_{r2} = 77,73 \text{ } ^\circ\text{C Tomado de Tabla 8 ATA, (Carnicer, 1994).}$$

$$T_{r02} = 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Porcentaje de humedad sobre el inicial de aspiración.

$$W_2 = 100\%$$

### **Etapas 3 Salida de condensado del Refrigerador**

En la salida del refrigerador la temperatura es de 30°C

$$h_{ab} = 3,27 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \quad \text{Tabla 8 ATA a } 30^\circ\text{C (Carnicer, 1994)}$$

Se calcula la cantidad de condensado.

$$C_3 = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot X (h_i - h_f)$$

$$C_3 = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 6,85 \cdot 85 \cdot \left( 31,11 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} - 3,27 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \right) = 11,67 \text{ l/h}$$

$$C'_3 = h_i - h_f$$

$$C'_3 = \left( 31,11 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} - 3,27 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}} \right) = 27,84 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

Se determina la cantidad de caudal separado.

$$L_3 = \frac{C_3 \cdot E}{100} = \frac{11,67 \text{ l/h} \cdot 80}{100} = 9,336 \text{ l/h}$$

$$L'_3 = \frac{C'_3 \cdot E}{100} = \frac{27,84 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}} \cdot 80}{100} = 22,27 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}}$$

*Porcentaje de condensado separado respecto al inicial*

$$l_3 = \frac{22,27 \cdot 100}{31,11} = 71,58\%$$

#### **Etapla 4 Salida de Refrigerador y entrada a separador**

La humedad saturada a 30°C.

$$h_{s4} = 3,27 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}} \text{ Tabla de 8 ATA a } 30^\circ$$

*La humedad absoluta es igual a la humedad saturada en este punto, ya que es la máximo cantidad de vapor de agua que puede contener el aire en a esta temperatura.*

$$h_{ab4} = 3,27 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}}$$

$$h_{r4} = 100\%$$

*Se calcula el arrastre de líquido*

$$A_4 = C_3 - L_3 = 11,67 \frac{\text{l}}{\text{h}} - 9,33 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 2,34 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$A'_4 = C'_3 - L'_3 = 27,84 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}} - 22,27 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}} = 5,57 \frac{\text{g}_{\text{Agua}}}{\text{kg}_{\text{Aire seco}}}$$

Porcentaje de humedad inicial

$$W = \frac{3,27}{31,11} \cdot 100 = 10,51\%$$

#### **Etapla 5 Salida de condensados del separador**

*El separador retira todo el arrastre del sistema.*

$$L_5 = 2,34 \text{ l/h}$$

$$L'_5 = 5,57 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

Porcentaje de condensado separado respecto al inicial

$$l_5 = \frac{5,57 \cdot 100}{31,11} = 17,90\%$$

### **Etapas 6 Salida del separador y entrada al secador frigorífico**

$$h_{ab6} = 3,27 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

$$h_{s6} = 3,27 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

$$h_{r6} = 100\%$$

No existe arrastre.

$$A_6 = 0 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$A'_6 = 0 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

### **Etapas 7 Salida de condensados del secador frigorífico**

La humedad absoluta a 3°C.

$$h_{ab7} = 0,583 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}} \text{ Tabla 8 ATA (Carnicer, 1994)}$$

$$C_7 = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot X (h_i - h_f)$$

$$C_7 = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 6,85 \cdot 85 \cdot (3,27 - 0,583) = 1,126 \text{ l/h}$$

$$C'_7 = (h_i - h_f) = (3,27 - 0,583) = 2,687 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

$$L_7 = \frac{1,126 \text{ l/h} \cdot 100}{100} = 1,126 \text{ l/h}$$

$$L'_7 = \frac{2,687 \text{ g/kg} \cdot 100}{100} = 2,687 \frac{g_{\text{Agua}}}{kg_{\text{Aire seco}}}$$

$$l_7 = \frac{2,687 \cdot 100}{31,11} = 8,64\%$$

### Etapa 8 Salida de condensado del secador frigorífico al depósito

De la tabla 8 ATA en punto de rocío 3°C (Carnicer, 1994)

$$h_{ab8} = 0,583 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

El aire sale a una temperatura de 25°C del secador, la humedad saturada se obtiene de la tabla 8 ATA (Carnicer, 1994).

$$h_{s8} = 2,44 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

Por lo tanto, se tiene una humedad relativa de:

$$h_{r8} = \frac{0,583 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}}{2,44 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}} \cdot 100 = 23,8 \%$$

$$A_8 = 0 \text{ l/h}$$

$$A'_8 = 0 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

Porcentaje de humedad respecto a la humedad inicial

$$w = \frac{0,583}{11,76} = 4,95\%$$

La suma de los condensados separados del sistema más la humedad de salida del secador, debe ser igual a la humedad de entrada.

$$\sum L'_i + h_{ab8} = h_{ab1}$$

$$L'_3 + L'_5 + L'_9 + h_{ab8} = h_{ab1}$$

$$22,27 + 5,57 + 2,687 + 0,583 = 31,11 \frac{g_{Agua}}{kg_{Aire\ seco}}$$

En la configuración de red de aire comprimido estudiada el refrigerador retira 71,6% de humedad, el separador elimina el 17,9% y el secador un 8,64%.

El aire obtenido del secador, posee una humedad relativa de 23,8%, mismo que no formará condensados mientras el aire no se enfríe por debajo de los 3°C.

### 3.9.2. Condensado del sistema

Realizando el mismo procedimiento anterior se tabula los resultados del condensado producido y el condensado separado del sistema. Se denomina C – R – S -S a los grupos Compresor, refrigerador, separador, secador. La Tabla 58 y 59 indica el contenido de condensado y separado en cada etapa del sistema, para cada Grupo de compresor-Refrigerador-Separador-Secador-Tanque.

**Tabla 58**

*Caudal de condensado inicial y caudal de condensado separados.*

<b>Grupo</b>	<b>Caudal</b>	<b>Cond. de Refrig. l/h</b>	<b>Sep. de Refrig. l/h</b>	<b>Sep. de Separador l/h</b>	<b>Cond. de Secador l/h</b>	<b>Sep. de Secador l/h</b>
<b>C – R – S -S</b>	<b><math>\frac{m^3}{min}</math></b>	<b><math>C_3</math></b>	<b><math>L_3</math></b>	<b><math>L_5</math></b>	<b><math>C_7</math></b>	<b><math>L_7</math></b>
SFC 37	6,85	11,67	9,34	2,33	1,127	1,127
SFC 110 ST	19,59	33,37	26,70	6,67	3,221	3,221
ER 110	8,50	14,49	11,59	2,90	1,398	1,398
GA90V SD	15,97	27,21	21,77	5,44	2,626	2,626
CSD 125T	16,04	27,32	21,86	5,46	2,637	2,637
CSD 125	16,05	27,35	21,88	5,47	2,640	2,640
CSD 75	9,77	16,64	13,32	3,33	1,606	1,606
$\sum$ <b>tot</b>		158,06	126,45	31,61	15,26	15,26

**Tabla 59**

Contenido de condensado y separados por Kg de aire para los Grupos Compresor-Refrigerador-Separador-Secador-Tanque.

		Cond. de Refrig. g/kg	Sep. de Refrig. g/kg	Sep. de Separador g/kg	Cond. de Secador g/kg	Sep. de Secador g/kg
Todos los grupos	Caudal $\frac{m^3}{min}$	$C_3$	$L_3$	$L_5$	$C_7$	$L_7$
	6,85	27,84	22,27	5,57	1,126	1,126

### 3.10. Espesor de tubería

En el apartado 4.1.2. de la B31.3 se especifica la ecuación para calcular el espesor de tubería.

$$t = \frac{P(d + 2c)}{2(SEW - P(1 - Y))}$$

Donde:  $P$  es la presión de diseño,  $D$  diámetro exterior,  $d$ = diámetro interior,  $c$  es la corrosión admisible,  $E$  factor de calidad,  $P$  presión interna,  $S$  Esfuerzo del material,  $Y$  coeficiente de tabla de B31.3

Se considera una presión interna de diseño de 10bar (145,038 psi) y la corrosión de 0,03 in.

$E = 0,8$  para aceros al carbono (Tabla A1-A)

$Y = 0,4$  (De la Tabla 304.1.1 de la B3.13)

$W = 1$  (Del apartado 302.3.5 de la B31.3)

Espesor de tubería para anillo MCC y Anillo Planta de Humos.

Diámetro interno =  $\varnothing 4$

$$t = \frac{145,038 \text{ psi} (4 \text{ in} + 2(0,03 \text{ in}))}{2(1 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 20 \text{ ksi})}$$

$$t = 0,046 \text{ in}$$

Espesor anillo de Nave de Horno

Diámetro interno=Ø3

$$t = \frac{145,038 \text{ psi } (3 \text{ in} + 2(0,03 \text{ in}))}{2(1 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 20 \text{ ksi})}$$

$$t = 0,035 \text{ in}$$

Espesor de Manifold 1

Diámetro interno=Ø6

$$t = \frac{145,038 \text{ psi } (6 \text{ in} + 2(0,03 \text{ in}))}{2(1 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 20 \text{ ksi})}$$

$$t = 0,068 \text{ in}$$

Espesor de Manifold 2

Diámetro interno=Ø5

$$t = \frac{145,038 \text{ psi } (5 \text{ in} + 2(0,03 \text{ in}))}{2(1 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 20 \text{ ksi})}$$

$$t = 0,057 \text{ in}$$

**Tabla 60**

*Espesores mínimos calculados de acuerdo a la presión y temperatura de servicio del sistema; y espesores de cédula 40 para acero negro.*

Diámetro (in)	Espesor calculado para presión y temperatura de servicio (in)	Espesor cédula 40 según ASME B31.3 (in)
Ø2	0,023	0,154
Ø3	0,035	0,216
Ø4	0,046	0,237
Ø5	0,057	0,258
Ø6	0,068	0,280

En la Tabla 60 se compara el espesor calculado con el espesor de tubería de cédula 40 mencionado en el ASME 31.3 en acero negro para tuberías de 3, 4, 5 y 6 pulgadas de

diámetro, el espesor de tubería cédula 40 en acero negro es suficiente para el transporte de aire comprimido.

El material seleccionado es el A53 Gr B que se usa en la industria para el transporte de fluidos.

### 3.11. Dimensionamiento de Bridas para conexión a válvulas

La norma ASME B 31.3 indica que para este fluido si es permitido la utilización de juntas bridadas; este sistema de aire comprimido estará expuesto a una temperatura máxima de 35°C (95 °F) y una presión de trabajo máxima de 125 psi, de acuerdo a la Tabla F2-1.5 de la norma B16.5 en materiales del Grupo 1.1 se necesitan Bridas de Clase 150.

### 3.12. Dimensionamiento de válvulas

Para el dimensionamiento de válvulas se considera la norma ASME B16.34, indica que, para una temperatura de 35°C y una presión de 125 psi de servicio, utilizando un material del Grupo 1.1 se necesita una válvula de clase 150.

El espesor mínimo de válvulas según el ASME B16.34 se calcula de la siguiente manera.

$$t = 1,5 \left( \frac{P_c \cdot d}{25 \cdot S_f - 12P_c} \right)$$

Donde  $t$  es el espesor calculado,  $P_c$  es la clase a la que pertenece la válvula,  $d$  es el diámetro interno de la válvula,  $S_f$  es una constante igual a 7000.

Ejemplo de cálculo para tubería de  $\varnothing 2$  in.

$$t = 1,5 \left( \frac{150 \cdot 2}{2 \cdot 7000 - 12(150)} \right)$$

$$t = 0,036 \text{ in}$$



**Tabla 61**

*Espesores mínimos calculados para válvulas a la presión y temperatura de servicio del sistema, para Clase 150.*

Diámetro (in)	Espesor calculado para presión y temperatura de servicio (in)
Ø2	0,036
Ø3	0,055
Ø4	0,073
Ø5	0,092
Ø6	0,111

### 3.13. Coeficiente de válvula $C_v$

Para este sistema se considera que el fluido es subcrítico ya que cumple con la condición de (Boumann, 1963), donde  $P_1$  es la presión aguas arriba y  $P_2$  es la presión aguas abajo:

$$P_1 < 2 \cdot P_2$$

$$8 \text{ bar} < 12 \text{ bar}$$

Por lo que se utiliza la siguiente fórmula para calcular el coeficiente de válvula por flujo volumétrico (Boumann, 1963):

$$C_v = \frac{Q}{963} \sqrt{\frac{G_g T}{\Delta P (P_1 + P_2)}}$$

Donde  $C_v$  = coeficiente de válvula,  $Q$  Flujo volumétrico (scfh);  $T$  Temperatura °R;  $G_g$  Gravedad específica (aire = 1);  $P_1$  presión aguas arriba;  $P_2$  Presión aguas abajo (psi);  $\Delta P$  Caída de presión  $P_1 - P_2$  (psi).

#### Ejemplo para válvulas de MCC

$$Q = 1114,2 \text{ m}^3/\text{h} \approx 39\,347,6 \text{ scfh}$$

$$T = 35^\circ\text{C} = 554,67^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 125 \text{ psi}$$

$$P_2 = 87 \text{ psi}$$

$$C_v = \frac{39347,6}{963} \sqrt{\frac{(1)(554,67)}{(38)(125 + 87)}}$$

$$C_v = 10,72 \frac{scfh}{psi} = 4,46 \frac{m^3}{bar}$$

El valor  $C_v$  para planta de humos indica que por 4 metros cúbicos de aire comprimido a 35°C que pasa por la válvula existe 1 bar de caída de presión. A continuación, se tabula los datos de coeficientes de válvulas para los demás elementos del sistema.

**Tabla 62**  
*Coeficiente de válvula para los elementos del sistema.*

<b>Elemento</b>	<b>Caudal (<math>m^3/h</math>)</b>	<b>Coeficiente de válvula <math>C_v</math></b>
Válvulas de tramo Cuarto de compresores hacia Nave de Horno	574,57 $m^3/h$	2,301 $\frac{m^3}{bar}$
Anillo Nave Horno	287,29 $m^3/h$	1,151 $\frac{m^3}{bar}$
Válvulas de tramo Cuarto de compresores hacia Nave de MCC	1114,2 $m^3/h$	4,463 $\frac{m^3}{bar}$
Válvulas de Anillo Nave MCC	557,10 $m^3/h$	2,231 $\frac{m^3}{bar}$
Válvulas de red Planta de Humos	941,57 $m^3/h$	3,771 $\frac{m^3}{bar}$

### 3.14. P&ID del sistema de aire comprimido

El P&ID del sistema de aire comprimido se muestra en el Anexo N. Este diagrama detalla los elementos del cuarto de compresores y su disposición.

### 3.15. Layout de la red principal del sistema de aire comprimido

En la Figura 32 se muestra el Layout de la Planta de Acería de Andec S.A., se detalla el consumo de aire comprimido de cada una de sus áreas, que comprende la Planta Humos, la Nave de Horno Eléctrico y la Nave de la MCC; se observa un esquema del trazado de la red de tubería principal, se indica la ubicación del espacio para el cuarto de aire comprimido.

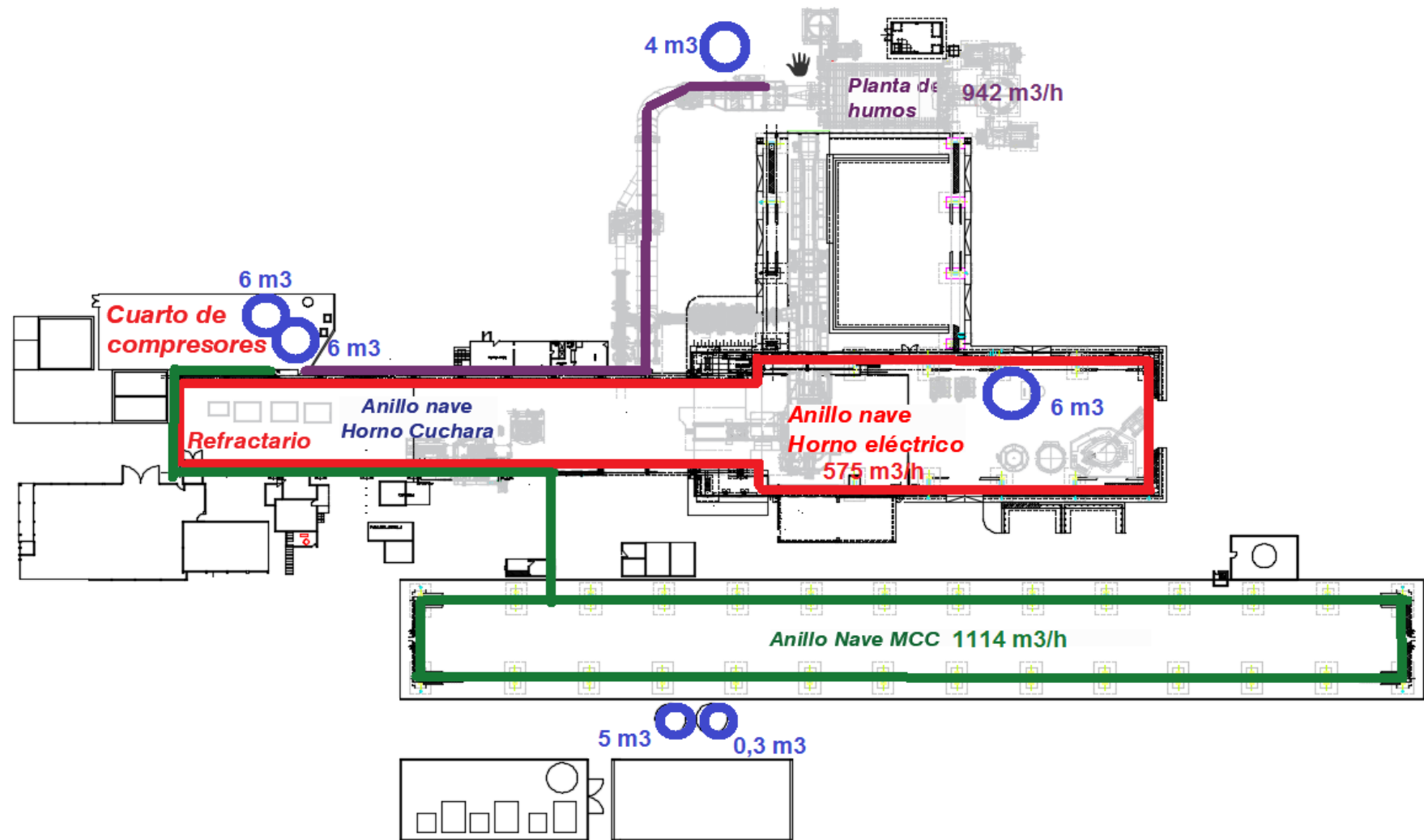


Figura 32 Layout del sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A.

## CAPITULO IV

### 4. INGENIERÍA DE DETALLE

#### 4.1. Lista de equipos y materiales

La lista de equipos y materiales que incluye el sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A. se detalla en la Tabla 63.

**Tabla 63**

*Lista de materiales para sistema de aire comprimido de Planta de Acería de ANDEC S.A.*

Denominación	Descripción
<b>Compresores</b>	Kaeser SFC 37
	Kaeser SFC 110 ST
	Betico ER 110
	Atlas GA90VSD
	Kaeser CSD 125T
	Kaeser CSD 125
	Kaeser CSD 75
<b>Secadores</b>	Kaeser TD76
	Kaeser TF210E
	Kaeser TF171E
	Kaeser TE91
	Sullair SRL 700
<b>Materiales de Cuarto de compresores</b>	Tubería de $\varnothing 6''$ CED 40 – Acero negro (6 m)
	Codo 90° $\varnothing 6''$ - Acero negro
	Brida ciega $\varnothing 6''$ - Acero negro
	Brida $\varnothing 6''$ 150 lb - Acero negro
	Válvulas Globo bridada $\varnothing 6''$
	Abrazadera tipo U 170 mm
	Tubería de $\varnothing 2''$ CED 40– Acero negro (6 m)
	Codo 90° $\varnothing 2''$ - Acero negro
	Válvulas Bola bridada $\varnothing 2''$
	Bridas $\varnothing 2''$ - Acero negro
	Abrazaderas tipo U 60 mm
	Tubería de $\varnothing 3''$ CED 40– Acero negro (6 m)
	Codo 90° $\varnothing 3''$ - Acero negro
	Válvulas Bola bridada $\varnothing 3''$

**CONTINÚA**

	Bridas $\varnothing$ 3" 150 lb
	Abrazaderas tipo U 80 mm
	Filtro KOR 375
	Filtro KFS 375
	Filtro KOR 485.2.5
	Filtro KOR 485.2.5
	Eco drain 30
	Eco drain 13
	Aquamat 38
	Tubo galvanizado $\varnothing$ 3/4"
	Abrazaderas tipo U 32 mm
	Tanque pulmón 6000 litros
	Perfil 100x50x5 (6 m)
	Placa 1200X2440x5
	Pernos de anclaje KB 3/8" 2 - 3/8"
<b>Materiales de red de Nave de Horno Eléctrico</b>	Tubería de $\varnothing$ 3 in CED 40 – Acero negro (6 m)
	Codos soldable $\varnothing$ 3"
	Abrazadera tipo U 80 mm
	Válvula esfera $\varnothing$ 3" bridada
	Brida $\varnothing$ 3" 150 lb
	Tanque pulmón 6000 litros
	Tubería de $\varnothing$ 3/4" CED 40 – Acero negro (6 m)
	Tubería de $\varnothing$ 1/2" CED 40 – Acero negro (6 m)
	Válvula de paso rápido roscada $\varnothing$ 1/2"
<b>Materiales de red de Nave MCC</b>	Tubería de $\varnothing$ 4" CED 40 – Acero negro (6 m)
	Codo 90° $\varnothing$ 4" soldable
	Abrazadera tipo U 110 mm
	Válvula esfera $\varnothing$ 4" bridada
	Brida $\varnothing$ 4" 150 lb
	Tubería de $\varnothing$ 3/4" CED 40 – Acero negro (6 m)
	Tubería de $\varnothing$ 1/2" CED 40 – Acero negro (6 m)
	Válvula de paso rápido roscada $\varnothing$ 1/2"
	Tanque pulmón 5000 litros
Tanque pulmón 300 litros	
<b>Materiales de red de Planta de Humos</b>	Tubería de $\varnothing$ 4 " CED 40 – Acero negro (6 m)
	Codo 90° $\varnothing$ 4" soldable
	Codo 45° $\varnothing$ 4" soldable
	Abrazadera tipo U 110 mm
	Válvula esfera $\varnothing$ 4" bridada
	Brida $\varnothing$ 4" 150 lb
Tanque pulmón 4000 litros	

## 4.2. Especificaciones de equipos

### 4.2.1. Especificaciones técnicas de Compresores

Las especificaciones técnicas de los compresores que incluye el sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A. se detalla en la Tabla 64.

**Tabla 64**

*Especificaciones técnicas de compresores.*

Modelo	Caudal	Potencia (HP)	P. máx	Voltaje	Año de inicio de operación	Incluye secador
Kaeser SFC 37	411 $\frac{m^3}{h}$	50	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2007	No
Kaeser SFC 110 ST	1175 $\frac{m^3}{h}$	148	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2009	Sí
Betico ER 110	510 $\frac{m^3}{h}$	148	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2009	No
Atlas Copco GA90VSD	958 $\frac{m^3}{h}$	125	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2006	No
Kaeser CSD 125T	962 $\frac{m^3}{h}$	125	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2012	Sí
Kaeser CSD 125	963 $\frac{m^3}{h}$	125	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2013	No
Kaeser CSD 75	586 $\frac{m^3}{h}$	75	8,79 bar	460V/3P h/60Hz	2013	No

### 4.2.2. Especificaciones técnicas de Secadores

Las especificaciones técnicas de los secadores que incluye el sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A. se detalla en la Tabla 65.

**Tabla 65**

*Especificaciones técnicas de secadores.*

Marca	Modelo	Conexión	Voltaje	Año de inicio de operación	Tipo de secador
Kaeser	TD76	G2	400V/1Ph/50Hz	2011	Refrigeración
Kaeser	TF210E	3NPT	460V/3Ph/60Hz	2010	Refrigeración
Kaeser	TF171E	3NPT	460V/3Ph/60Hz	2013	Refrigeración
Kaeser	TE91	G2	460V/3Ph/60Hz	2013	Refrigeración
Sullair	SRL 700	3" NPT-F	460V/3Ph/60Hz	2009	Refrigeración

### 4.2.3. Especificaciones técnicas de filtros

Las especificaciones de los filtros seleccionados se encuentran en la Tabla 66 y Tabla 67. De acuerdo a Kaeser (2005) los filtros seleccionados suministran un aire comprimido de calidad nivel 3.

**Tabla 66**

*Especificaciones generales de filtros de aire comprimido KOR y KFS.*

<b>Filtro</b>	<b>Especificaciones</b>
Filtro separador Kaeser (KFS)	Instalación después del posenfriador, ver Figura 26. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de Líquidos: 99% de agua</li> <li>• Capacidad de saturación de líquidos: 25000 ppm w/w</li> <li>• Remoción de partículas sólidas: 3 micrones</li> <li>• Paso de aceite: 5 ppm w/w.</li> <li>• Caída de presión: 1psi seco, 1.5 psi mojado.</li> </ul>
Filtro Kaeser para remoción de aceite (KOR)	Instalación después del secador. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de Líquidos: 99% de aceites</li> <li>• Capacidad de saturación de líquidos: 1000 ppm w/w</li> <li>• Remoción de partículas sólidas: 0,01 micrones</li> <li>• Paso de aceite: 0,01 ppm w/w.</li> <li>• Caída de presión: 1psi seco, 3 psi mojado.</li> </ul>

La Tabla 67 indica las especificaciones técnicas de los filtros de aire comprimido.

**Tabla 67**

*Especificaciones técnicas de filtros de aire comprimido.*

<b>Modelo</b>	<b>Caudal a 100 psi (cfm)</b>	<b>Conexión</b>	<b>Presión máxima de trabajo (psi)</b>	<b>Dimensión An x Al (in)</b>	<b>Peso (lbs)</b>
KOR 375	375	1 ½" NPTF	250	6 ½ x 27 ½	11 ½
KFS 375	375	1 ½" NPTF	250	6 ½ x 27 ½	11 ½
KOR 485.2.5	485	2 ½" NPTF	250	7 ¾" x 31 ¼"	28
KFS 485.2.5	485	2 ½" NPTF	250	7 ¾" x 31 ¼"	28

#### 4.2.4. Especificaciones de drenajes de condensado.

Las especificaciones del drenaje de condensado se incluyen en la Tabla 68.

**Tabla 68**

*Especificaciones de drenaje de condensado.*

Modelo	Caudal máximo de compresor (cfm)	Dimensiones La x An x H (mm)	Peso (kg)	Voltaje de operación
Ecodrain30	29,3	164x65x118	0,8	95...240 VAC (50...60 Hz)/ 100..125 VDC
Ecodrain13	1059	212x93x162	2,0	230V/1Ph/50- 60Hz

#### 4.2.5. Especificaciones de unidad de tratamiento de condensado

Las especificaciones de la unidad de tratamiento de condensado se incluyen en la Tabla 69.

**Tabla 69**

*Especificaciones de Unidad de tratamiento de condensados.*

Modelo	Caudal máximo de compresor $m^3/min$	Conexión entrada de condensado	Conexión salida de agua	Conexión salida de aceite	Depósito colector de aceite	Peso (kg)	Dim. An x Prof x Al (mm)
CF8	29,3	3xDN13, 1xDN25	DN13	DN0	2x10L	36,5kg	530 x 764 x 1090

#### 4.2.6. Especificaciones técnicas de tanque de aire comprimido

Las especificaciones técnicas de los tanques de almacenamiento que incluye el sistema de aire comprimido para la Planta de Acería de ANDEC S.A. se detalla en la Tabla 70.



**Tabla 70***Especificaciones de Tanque de aire comprimido.*

<b>N</b>	<b>Volumen</b>	<b>Presión de trabajo</b>	<b>Presión de diseño</b>	<b>Temperatura de trabajo</b>	<b>Posición</b>	<b>Conexiones de entrada y salida</b>	<b>Cantidad</b>
1	6000 litros	8 bar	10 bar	15°C a 50°C	Vertical	6 in	2
2	6000 litros	8 bar	10 bar	15°C a 50°C	Vertical	5 in	1
3	5000 litros	8 bar	10 bar	15°C a 50°C	Vertical	4 in	1
4	4000 litros	8 bar	10 bar	15°C a 50°C	Vertical	4 in	2
5	200 litros	8 bar	10 bar	15°C a 50°C	Vertical	2 in	1

Cada tanque pulmón debe incluir manómetro, válvula de seguridad, drenaje, Manhole de inspección y limpieza. Acabado con pintura epóxico exterior e interior, previo sandblasting.

## 4.3. Manual de operaciones.

### 4.3.1. Sistema de control de compresores

La Tabla 71 detalla cuatro combinaciones que se pueden realizar para el funcionamiento del sistema, indicando los compresores que se encuentran en carga base y carga pico.

**Tabla 71**

*Compresores de carga base y carga pico, para Grupo 1 y Grupo 2, para las cuatro combinaciones analizadas.*

		Área
Caso 1	<b>Grupo 1</b> <i>Carga base:</i> SFC 110 ST <i>Carga pico:</i> CSD 75	Nave MCC y Nave de Horno
	<b>Grupo 2</b> <i>Carga base:</i> CSD 125 <i>Carga pico:</i> -	Planta de humos
Caso 2	<b>Grupo 1</b> <i>Carga base:</i> SFC 110 ST <i>Carga pico:</i> -	Nave MCC
	<b>Grupo 2</b> <i>Carga base:</i> CSD 125 <i>Carga pico:</i> ER 110 y SFC 37	Planta de humos y Nave de Horno
Caso 3	<b>Grupo 1</b> <i>Carga base:</i> SFC 110 ST <i>Carga pico:</i> -	Planta de Humos
	<b>Grupo 2</b> <i>Carga base:</i> CSD 125 <i>Carga pico:</i> ER 110 y SFC 37	Nave MCC y Nave de Horno
Caso 4	<b>Grupo 1</b> <i>Carga base:</i> SFC 110 ST <i>Carga pico:</i> CSD 75	Planta de humos y Nave de Horno
	<b>Grupo 2</b> <i>Carga base:</i> CSD 125 <i>Carga pico:</i> SFC 37	Nave MCC

En la Tabla 72 se muestran los parámetros de configuración de los compresores para su control por cascada. Cada compresor posee un diferencial de presión de 10 psi (0,7 bar) y el rango de presión

de traslape entre compresores de 3 psi (0,2 bar). En la Tabla 23 se indica los compresores que se encuentran en carga base y carga pico, para las cuatro configuraciones planificadas del sistema.

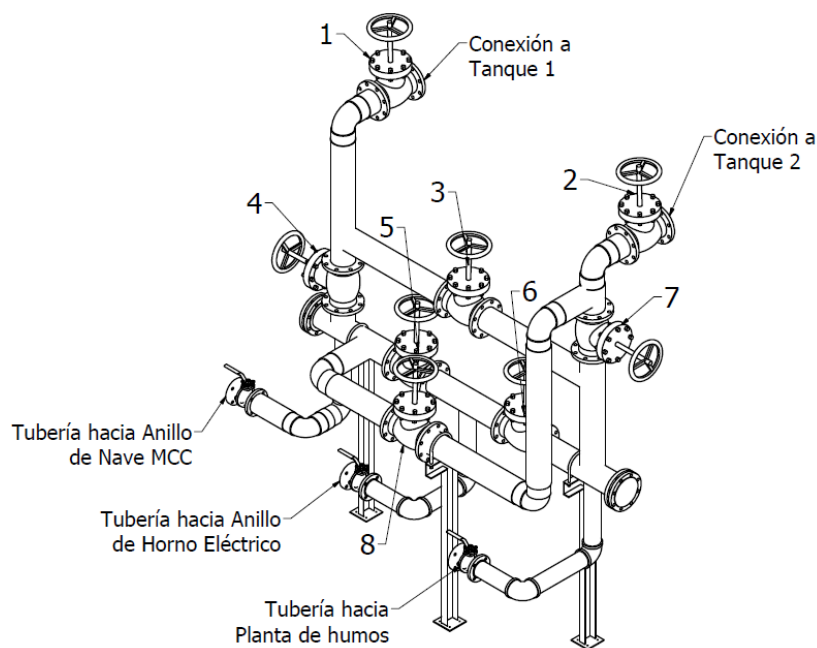
**Tabla 72**

*Parámetros de configuración de presión para compresores.*

Compresor	Presión mínima (indica el momento cuando entra en carga)	Presión máxima (indica el momento cuando entra en descarga)
Carga Base	115 psi (7,93 bar)	125 psi (8,61 bar)
Carga Pico	108 psi (7,45 bar)	118 psi (8,14 bar)

#### 4.3.2. Sistema de control de direccionamiento de flujo

La Tabla 73 indica las válvulas que se encuentran abiertas (A) y cerradas (C) en el sistema de direccionamiento de flujo, según la configuración que se necesite. La Figura 33 muestra un esquema del sistema de válvulas en el que se identifica las entradas y las salidas del aire comprimido.



**Figura 33** Sistema de válvulas de direccionamiento de flujo.

**Tabla 73***Sistema de válvulas de direccionamiento de flujo.*

		Área	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Caso 1	Grupo 1	Nave MCC y Nave de Horno								
	Grupo 2	Planta de humos	A	A	C	A	A	C	A	C
Caso 2	Grupo 1	Nave MCC								
	Grupo 2	Planta de humos y Nave de Horno	A	A	C	A	C	A	A	C
Caso 3	Grupo 1	Planta de Humos								
	Grupo 2	Nave MCC y Nave de Horno	A	A	A	C	A	C	C	A
Caso 4	Grupo 1	Planta de humos y Nave de Horno								
	Grupo 2	Nave MCC	A	A	A	C	C	A	C	A

## 4.4. Plan de mantenimiento

La Tabla 74 detalla el plan de mantenimiento para los compresores que dispone el sistema.

**Tabla 74**

*Programa de mantenimiento de compresores.*

<b>Actividad</b>	<b>Hora programada</b>
Filtro de aceite	3000
Separador de aceite	6000
Cambio de aceite	3000
Filtro de aire	3000
Tensión de bandas	3000
Cambio de rodamientos de motor	32000
Cambio de rodamientos de ventilador	32000
Lubricación de rodamientos	2000
Inspección de válvulas	12000

La Tabla 75 detalla las horas programadas para el mantenimiento para los secadores que dispone el sistema.

**Tabla 75**

*Mantenimiento de secador.*

<b>Actividad</b>	<b>Hora programada</b>
Filtro de aceite	3000

## 4.5. Planos de detalle y montaje

Los planos de detalle y montaje se incluyen en el ANEXO N.

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE COSTOS

#### 5.1. Costo de materiales, insumos, instalación e ingeniería.

La Tabla 76 resume los costos de los materiales, suministros, instalación, e ingeniería con un total de \$213356,20. La Tabla 103 del Anexo M, muestra en detalle el costo del proyecto.

**Tabla 76**

*Resumen de costos de proyecto en materiales, suministros, instalación e ingeniería.*

Denominación	Valor
Materiales	\$ 111936,10
Suministros e instalación	\$ 89420,06
Ingeniería Básica y de Detalle	\$ 1500,00
<b>Total</b>	\$ 213356,20
<b>Total (+ 10% de imprevistos)</b>	\$221491,80

#### 5.2. Coste de energía de sistema actual versus sistema propuesto.

Los consumos de la potencia específica de los compresores se realizaron a través de la ecuación descrita en el apartado 2.9.1. del texto. El caudal de aire entregado por la unidad “FAD” ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) y el consumo eléctrico (Kw), se obtuvieron a partir del catálogo de cada compresor. Para este cálculo se considera que los compresores estén a plena carga.

##### 5.2.1. Potencia específica consumida por el sistema

El sistema actual de aire comprimido utiliza cinco de los ocho compresores que dispone la empresa.

Los compresores que suministran aire comprimido a la planta son los dos KAESER CSD 75, el

SFC 110 T, Kaeser SFC 37 y Kaeser CSD125. Los compresores Atlas Copco GA90VSD, Betico ER 110, Kaeser CSD125 T, casi no se utilizan. La potencia específica para el sistema actual es de 0,54 Kw/(m<sup>3</sup>/h). Ver Tabla 77.

**Tabla 77**

*Potencia específica consumida por compresores en el sistema de aire comprimido actual.  
(Cálculo realizado con 85% de eficiencia de motor)*

	<b>FAD de la unidad m<sup>3</sup>/h</b>	<b>Consumo eléctrico Kw</b>	<b>Potencia específica Kw/(m<sup>3</sup>/h)</b>
Kaeser CSD75	586	65,88	0,11
Kaeser CSD 75	586	65,88	0,11
Kaeser SFC 110T	1175	129,41	0,11
Kaeser SFC 37	411	41,11	0,10
Kaeser CSD125	963	103,33	0,11
		<b>Total</b>	0,54

**Tabla 78**

*Potencia específica consumida por compresores en el sistema de aire comprimido propuesto.  
(Cálculo realizado con 85% de eficiencia de motor)*

	<b>FAD de la unidad m<sup>3</sup>/h</b>	<b>Consumo eléctrico Kw</b>	<b>Potencia específica Kw/(m<sup>3</sup>/h)</b>
Kaeser CSD 75	586	65,88	0,11
Kaeser SFC 110T	1175	129,41	0,11
Kaeser SFC 37	411	41,11	0,10
Kaeser CSD125	963	103,33	0,11
		<b>Total</b>	0,43

En el sistema propuesto se utiliza un máximo de cuatro compresores, la Tabla 78, está elaborada de acuerdo al caso 4 descrito en el apartado 3.7.2, en este caso los compresores utilizados son Kaeser CSD 75, Kaeser SFC 110T, Kaeser SFC 37 y Kaeser CSD125. Para el sistema propuesto la potencia específica de acuerdo a la fórmula del apartado 2.9.1 es 0,43 Kw/(m<sup>3</sup>/h).

### 5.2.2. Coste energético por mes

Para este cálculo se realiza para 6 días de la semana, una jornada de 10 horas. El consumo total de la planta es de 2630,4 m<sup>3</sup>/h (1548,2 cfm). El costo eléctrico de Kwh en el año 2018 para Ecuador es de 0,09 \$/Kwh.

Para calcular el costo energético (\$/mes) se realiza mediante la siguiente fórmula Kaeser (2010).

$$\text{Costo energético } \$/\text{mes} = \frac{\text{Potencia específica } Kw}{m^3/h} \times \text{Consumo de aire } m^3/h \times \frac{\text{Tiempo } \text{Horas}}{\text{mes}} \times \text{Costo de electricidad } \$/Kwh$$

De acuerdo a la Tabla 79 el costo energético mensual para el sistema de aire comprimido actual es de 30812,96 \$/mes.

**Tabla 79**

*Costo energético mensual de sistema de aire comprimido actual.*

Potencia específica Kw/(m <sup>3</sup> /h)	Tiempo Horas/mes	Consumo de aire m <sup>3</sup> /h	Costo eléctrico \$/Kwh	Costo energético \$/mes
0,54	240	2630,4	0,09	30812,96

- *Sistema de aire comprimido propuesto*

De acuerdo a la Tabla 80 el costo energético mensual para el sistema de aire comprimido propuesto es de 24425,02 \$/mes.

**Tabla 80**

*Costo energético mensual de sistema de aire comprimido propuesto.*

Potencia específica Kw/(m <sup>3</sup> /h)	Tiempo Horas/mes	Consumo de aire m <sup>3</sup> /h	Costo eléctrico \$/Kwh	Costo energético \$/mes
0,43	240	2630,4	0,09	24425,02



### 5.3. Beneficio económico

Al comparar el costo energético del sistema actual y el sistema propuesto obtenidos de la Tabla 79 y Tabla 80 respectivamente, se calcula un beneficio económico mensual de \$6387,93 y anual de \$76655,21, ver Tabla 81.

**Tabla 81**

*Beneficio económico mensual al comparar sistema actual con sistema propuesto.*

	Costo energético (\$/mes)
Sistema actual	30812,96
Sistema propuesto	24425,02
<b>Beneficio económico (\$/mes)</b>	<b>6387,93</b>

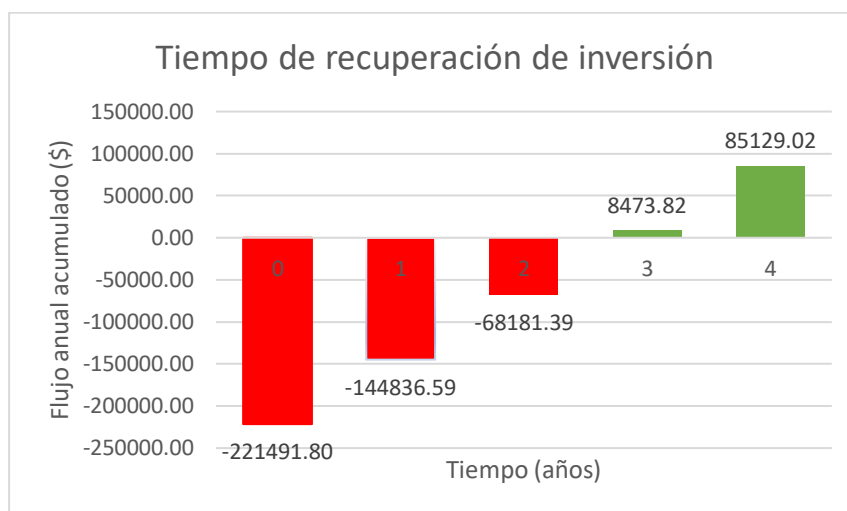
### 5.4. Flujo de caja anual

El proyecto propuesto se estimó que tenga un tiempo de vida útil de 10 años, la Tabla 82 y Figura 34 muestran el flujo anual y flujo anual acumulado.

**Tabla 82**

*Flujo de anual y flujo anual acumulado.*

Año	Flujos anuales (\$)	Flujos anuales acumulados (\$)
0	-221491,80	-221491,80
1	76655,20	-144836,59
2	76655,20	-68181,39
3	76655,20	8473,82
4	76655,20	85129,02
5	76655,20	161784,23
6	76655,20	238439,43
7	76655,20	315094,64
8	76655,20	391749,84
9	76655,20	468405,05
10	76655,20	545060,25



**Figura 34** Tiempo de recuperación de inversión.

El flujo anual acumulado es positivo desde el tercer año con \$8473,82 considerando un beneficio anual de \$76655,20.

## 5.5. Cálculo de indicadores de rentabilidad.

El sistema propuesto tiene un Valor Actual Neto (VAN) de \$163222,94; Tasa interna de retorno (TIR) de 33%, Relación Costo/Beneficio de 2,46.

### Tabla 83

*Valor actual neto, Tasa interna de retorno y relación Costo/Beneficio.*

<b>VAN</b>	\$ 163222,94
<b>TIR</b>	33%
<b>Relación Costo/Beneficio</b>	2,46

El VAN se calculó con una tasa de interés del 15% este valor al ser mayor que cero indican que el proyecto es viable, este valor al igual que el TIR se determinó a partir de una Hoja de cálculo elaborada en Microsoft Excel, sin embargo, en el apartado 2.10 se adjunta la fórmula para calcularlo de forma manual. Para la relación Costo/Beneficio se relacionó la inversión inicial del proyecto con el flujo anual acumulado del décimo año, este valor al ser mayor que uno indica que el proyecto es rentable.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES

- Se desarrolló la ingeniería conceptual, básica y de detalle para el sistema de aire comprimido centralizado de 125 psi para ANDEC S.A; en la ingeniería conceptual se profundizó el estudio de los principios científicos y tecnológicos para el desarrollo de un sistema de aire comprimido ideal; en la ingeniería básica se identificó la demanda y requerimientos específicos de aire, se realizó la selección de equipos y componentes, se elaboró una descripción de funcionamiento, un layout de la planta y un diagrama P&ID; en la ingeniería de detalle se generó un listado de equipos y componentes con especificaciones, planos de montaje y detalle, un manual de mantenimiento y operaciones.
- Se realizó una investigación bibliográfica de los fundamentos científicos y tecnológicos orientado a la optimización del consumo energético, utilización máxima de la capacidad instalada y la ejecución de mantenimientos planificados sin necesidad de cortes de producción.
- Se determinó que la planta de Acería de ANDEC S.A. demanda un caudal máximo simultáneo de  $2630,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (1548,2 cfm), donde el mayor consumidor de aire comprimido es la Nave de la Máquina de Colada Continua con el 42%, seguido por la Red de Planta de Humos y la Nave de Horno Eléctrico con 36% y 22% respectivamente. Se determinó que la calidad de aire requerida por el sistema según la norma ISO8573-1 respecto al máximo contenido de partículas por metro cúbico y contenido de aceite pertenece a la Clase 3, respecto a la presión de punto de rocío pertenece a la Clase 4, en base a estas

especificaciones de calidad de aire se realizó la selección del equipo y accesorios de tratamiento de aire comprimido.

- Se estableció alternativas de configuración del sistema de aire comprimido considerando costo-beneficio, se seleccionó un sistema con una estación de compresores centralizada, conformado por dos grupos de cuatro compresores; se determinó que los compresores de mayor capacidad sirvan para soportar la carga base y los de menor capacidad cubran la carga pico, esto reduce el consumo de energía eléctrica, permite utilizar con mayor eficiencia la capacidad instalada, posibilita un control por cascada sin caídas de presión significativas y además simplifica una futura instalación de un sistema de control SAM (Sigma Air Manager); los equipos deben operar a la presión más baja y eficiente, el incremento de la presión de descarga provoca el aumento de usos no regulados como fugas y resulta en el incremento del consumo energético. Para esta alternativa la red de aire comprimido está interconectada en el cuarto de compresores, donde se encuentra un sistema de válvulas que permiten direccionar el flujo de aire de acuerdo a las circunstancias y necesidad del momento, los anillos que suministran aire comprimido son independientes, es decir, no están interconectados entre sí, esto permite monitorear el consumo de aire por área y posibilita cortes parciales sin causar una paralización total de la planta reduciendo pérdidas económicas.
- Se desarrolló procedimientos de utilización y mantenimiento del sistema de aire comprimido; el procedimiento de utilización elaborado especifica la presión mínima y presión máxima de operación para los compresores que cubren la carga base y carga pico de acuerdo a la configuración asignada al juego de válvulas, además este procedimiento incluye indicaciones para el sistema de direccionamiento de flujo dependiendo de la

necesidad; el procedimiento de mantenimiento se realizó enfocado en acciones preventivas que permita alargar la vida útil de los componentes garantizando confiabilidad y disponibilidad del sistema.

- Se generó planos de instalación y memorias de cálculo; los planos de instalación se encuentran en el Anexo N, estos indican dimensiones, ubicación y disposición de los elementos del sistema; la memoria de cálculo desarrollada comprende el cálculo de factores de utilización y simultaneidad de unidades consumidoras, dimensionamiento de componentes del sistema, y cálculo de pérdida de presión en la red.
- El costo del proyecto en cuanto a materiales, suministros, instalación e ingeniería tiene un valor de \$ 221491,80, cuya inversión se recuperaría en el tercer año una vez realizada su implementación, el proyecto generará un ahorro de 6387,93 \$/mes. En el análisis de costo se obtuvo un valor actual neto de \$16322,94 calculado con una tasa de corte de 15%, la tasa interna de retorno es de 33% y el costo beneficio de 2,46.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda incentivar las relaciones Universidad – Empresa con el propósito de continuar realizando proyectos similares que beneficien a ambas partes y promuevan la generación de proyectos e innovaciones tecnológicas que contribuyan al desarrollo del país.
- Se recomienda investigar la viabilidad de instalar un sistema de recuperación de calor en el cuarto de compresores que beneficie a otros sistemas de la Planta de Acería de Andec S.A.
- El estudio desarrollado para la demanda de aire del sistema se elaboró respecto al caudal máximo simultáneo indicado por el fabricante de cada unidad consumidora, se recomienda realizar un Análisis de la Demanda de Aire “ADA” (llevada a cabo por técnicos y equipos

Kaeser) que permita conocer con mayor exactitud la variación del consumo de aire y presión durante la jornada que posibilite identificar, corregir y mejorar deficiencias en la regulación de compresores.

- Para mejorar el aprovechamiento de la capacidad instalada y reducir costos por consumo eléctrico en el sistema de aire comprimido, se recomienda instalar un sistema de control SAM (Sigma Air Manager) que permita secuenciar los compresores según su número de horas de trabajo y la demanda requerida por el sistema.
- Se recomienda incluir acciones en el plan de utilización que permitan monitorear y evaluar periódicamente el consumo de aire comprimido en la red, con el propósito de identificar fugas y usos no regulados.

## BIBLIOGRAFÍA

AtlasCopco. (2011). *Manual de aire comprimido*. Wilrijk: Atlas Copco Airpoer NV.

Baumann, H. (1963). *The introduction of a Critical Flow Factor for Valve Sizing*. ISA Transactions.

Beals, C., Ghislain, J., Kemp, H., & McCulloch, D. (2003). *Improving Compressed Air System Performance*. Washington D.C.: Compressed Air Challenge.

Berrío, L., & Ochoa, S. (2007). *Neumática básica*. Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano.

Bruno, S. (s.f.). *Piping and Ventilation Guidelines for Proper Air Compressor Installations*.

Obtenido de Compressed Air Best Practices: <https://www.airbestpractices.com/system-assessments/pipingstorage/piping-and-ventilation-guidelines-proper-air-compressor-installatio>

CAGI. (2016). *Compressed Air & Gas Handbook*.

Canales, R. (2015). *Criterios para la toma de decisión de inversiones*. Managua: UNAN.

Carnicer, E. (1994). *Aire comprimido*. Madrid: Parafino.

Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México: McGRAW - HILL.

*Dryers – KAESER KOMPRESSOREN*. (2018). Obtenido de KAESER:

<https://www.kaeser.com/int-en/products/air-treatment-and-condensate-technology/dryers/>

Ebel, F. (2009). *Fundamentos Neumática y Electroneumática*. Denkendorf: Festo Didactic GmbH.

Eletrobrás. (2005). *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO*. Río de Janeiro.

EXA. (2017). *Estación Climatológico de Guayaquil*. Obtenido de EXA: <http://gye.exa.ec/>

FIAC. (2018). *FIAC Air Compressors*. Obtenido de

<http://www.fiac.it/wwwassfiac/moduli/pdf/manuali/7348530040.pdf>

Guillén, A. (2009). *Introducción a la neumática*. Barcelona: Marcombo.

Hesse, S. (2002). Aire comprimido, Fuente de energía. *Festo*. Obtenido de Laboratorio de

Neumática y Oleohidráulica:

[http://www4.tecnun.es/asignaturas/neumatica/Practica%20Neumatica\\_Sol.pdf](http://www4.tecnun.es/asignaturas/neumatica/Practica%20Neumatica_Sol.pdf)

Hitachi. (30 de Junio de 2018). *Hitachi*. Obtenido de <http://www.hitachi->

[america.us/supportingdocs/forbus/isd/white\\_papers/Hitachi\\_White\\_Paper\\_Piping%20Spanish%20LR.PDF](http://www.hitachi-america.us/supportingdocs/forbus/isd/white_papers/Hitachi_White_Paper_Piping%20Spanish%20LR.PDF)

Kaeser. (2005). *Filtros para aire comprimido*. Obtenido de Kaeser Compresores:

<http://mx.kaeser.com/Images/LAFILTER-tcm57-6771.pdf>

Kaeser. (2010). *Técnica de aire comprimido*. Querétano: Kaeser Compresores.

Kaeser. (2015). *Guía de instalación de sistema de aire comprimido*. Querétaro: KAESSER

COMPRESSORS.

Kaeser. (4 de Julio de 2018). *Kaeser*. Obtenido de

<http://us.kaeser.com/m/Images/Gu%C3%ADa%20de%20instalaci%C3%B3n%20de%20sistemas%20de%20aire%20comprimido-tcm266-747662.pdf>

Majumdar, S. (1998). *Sistemas neumáticos: Sistemas de Mantenimiento*. España: McGraw - Hill.

Medina, U. (2015). *Instalación correcta de una estación de aire comprimido*. Obtenido de Kaeser

Compresores: <http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2015/12/09/instalacion-correcta-estacion-aire-comprimido/>



Morín, E. (2017). *Indicadores de Rentabilidad*. México: Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos.

Nayyar, M. (2000). *Piping Handbook*. New York: MCGRAW-HILL.

NGPSA. (2004). *ENGINEERING DATA BOOK*. Tulsa: Gas Processors Suppliers Association.

OGA. (2018). *OGA*. Obtenido de <http://www.oga.com.co/wp-content/uploads/2015/08/ANEXO-1-CALIDAD-DE-AIRE-NORMA-ISO.pdf> [Accedió el 17 marzo de 2018].

Parker. (2003). *Tecnología Neumática Industrial*. Jakareí: Parker.

Serrano, A. (2009). *Neumática Práctica*. Madrid: Paraninfo, S.A.