

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA



PIPASA, Planta San Rafael

“Evaluación y propuesta de rediseño del sistema de aire comprimido en la planta procesadora de pollo SRL Cargill, Costa Rica”

Informe de Práctica de Especialidad para optar por el título de ingeniero en
Mantenimiento Industrial con el grado académico de Licenciatura.

Jose Gregorio Venegas Mora

Cartago, junio, 2019

CARTA DE ENTENDIMIENTO

Fecha: 3 de junio del 2019

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas del Tecnológico

Yo Jose Gregorio Venegas Mora
carné No. 2013038981, si autorizo no autorizo, al Sistema de Bibliotecas del Tecnológico
(SIBITEC), disponer del Trabajo Final de graduación, del cual soy autor, para optar por el grado
de Licenciatura, en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento industrial
, presentado en la fecha 3 de junio del 2019, con el título "Evaluación y
propuesta de rediseño del sistema de aire comprimido de la planta PIPASA SRL (Cargill), San Rafael de
Alajuela, Costa Rica"

para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC, con el objetivo de ser visualizado a través de la red Internet.

Firma de estudiante:



Correo electrónico:

gregoriovm95@gmail.com

Cédula No.:

116070377

Profesor guía:

Ing. Oscar Bastos Molina

Asesores industriales:

Ing. Diego Quesada U.
Ing. Ricardo Paniagua M.
Ing. Jorge Romero A.

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, por guiarme paso a paso en este camino y darme las fuerzas para continuar a pesar de las adversidades. Por ser la luz que me guio hasta alcanzar la meta.

A mi madre, quien con su trabajo y esfuerzo hizo posible que yo haya llegado hasta acá. Por siempre estar ahí alentándome y apoyándome a seguir adelante con mis estudios. Por ser el ejemplo de superación más grande que conozco. Por amarme y buscar siempre lo mejor para mí. Por dejar atrás todo y darme un futuro mejor.

A mi hermana y hermano, por ser guías y ejemplos a seguir. Por apoyarme y ayudarme cuando lo necesité. Por ayudarme en este camino que ellos ya lograron recorrer antes.

A mi padre, por ser parte del apoyo para cumplir este gran logro en mi vida.

A padrino, a pesar de que ya no estás con nosotros, fuiste un gran ejemplo a seguir. Porque diste todo, hasta el último día de tu vida por mí y mis hermanos. A mi madrina, quien fue como una segunda madre y estuvo ahí dándome aliento y fuerzas para continuar.

A todas aquellas personas que, a través de mi vida escolar, colegial y universitaria, pusieron su granito de paciencia, experiencia y conocimiento para que yo pudiera alcanzar esta meta profesional.

Agradecimientos

Primeramente a Dios, quien hizo posible que yo cumpliera esta meta.

Al Ing. Ricardo Paniagua, por darme la oportunidad y abrirme las puertas de la empresa para realizar mi proyecto. A los Ing. Diego Quesada y Jorge Romero, los cuales estuvieron brindándome todo el apoyo y compartiendo sus conocimientos y experiencia.

Al Ing. Hernán Moros, por su tiempo y colaboración durante el proyecto. A todo el departamento de mantenimiento, supervisores y técnicos, por su disposición a colaborar durante mi práctica profesional.

Agradecer a todo el personal de la empresa, quienes me guiaron y ayudaron durante este proceso de práctica.

A todas y cada una de las personas que a través de mi vida han colaborado de una u otra forma en mi proceso de formación, quienes me han transmitido un poco de su experiencia, conocimiento y dedicado tiempo para cumplir esta meta, muchas gracias.

Tabla de contenidos

Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Tabla de contenidos	5
Figuras	8
Tablas	12
Ecuaciones.....	13
Capítulo 1. Resumen y reseña de la empresa.....	14
1.1 Resumen	15
1.2 Palabras clave:	16
1.3 Abstract	16
1.4 Keywords:.....	17
1.5 Misión	17
1.6 Visión.....	17
1.7 Descripción de la empresa	18
1.8 Descripción del proceso productivo.....	19
Capítulo 2. Descripción del proyecto	21
2.1 Introducción.....	22
2.2 Planteamiento del problema	23
2.3 Objetivo general	24
2.4 Objetivos Específicos	24
2.5 Metodología.....	25
2.6 Justificación	27
2.7 Vialidad.....	29
2.8 Alcance.....	30
2.9 Limitaciones.....	31
Capítulo 3. Marco Teórico	32
3.1 Definición y conceptos relacionados con el aire comprimido	33
3.2 Concepto de presión	33
3.3 Compresores.....	35

3.4	Humedad.....	38
3.5	Punto de rocío	39
3.6	Flujo de aire comprimido y su conversión	39
3.7	Calidad del aire comprimido según la ISO 8573:2010.....	41
3.8	Tratamiento del aire comprimido	42
3.9	Sistema general de aire comprimido (generación y demanda).	45
3.10	Diseño de sistemas de aire comprimido.....	48
3.10.1	Estimación del caudal	48
3.10.2	Perdida de presión y longitud equivalente	51
3.10.3	Cálculo y selección de tuberías	52
3.10.4	Tanque de almacenamiento.....	54
3.11	Sistemas de gestión de la energía, ISO 50001:2011.	55
3.12	Ahorro de energía en sistemas de aire comprimido.	57
3.12.1	Ahorro energético en el área del suministro o generación:	58
3.12.2	Ahorro energético en el área de la demanda:	60
3.13	Costo del aire comprimido.....	63
3.14	Costo de las fugas.....	64
3.15	Huella de carbono y gases de efecto invernadero	65
3.16	Indicadores financieros	66
Capítulo 4. Sistema de aire comprimido.....		69
4.1	Antecedentes del sistema	71
4.2	Estado actual del sistema.....	73
4.2.1	Cuarto de compresores.....	73
4.2.2	Tratamiento de aire	77
4.2.3	Convenio de mantenimiento con Kaeser.....	81
4.2.4	Sistema de tuberías	82
4.2.5	Equipos consumidores de aire comprimido.....	84
4.2.6	Demanda de aire comprimido de la planta.....	86
4.2.7	Evaluación del diámetro actual de la tubería según la demanda de aire .	88
4.2.8	Uso y consumo de energía	89
4.2.9	Deficiencias detectadas, costos asociados y oportunidades de mejora...	94
4.2.9.1	Caída de presión debido a la descarga del Blow Tank de viseras.....	94
4.2.9.2	Costos de afectación por condensados	96
4.2.9.3	Costo debido a uso inapropiado en el tamiz de harina	98

4.2.9.4	Fugas en la red de aire comprimido.....	100
4.2.9.5	Costo de oportunidad debido a paros de proceso	104
4.2.9.6	Costo aproximado debido a la perdida de presión en la red.....	106
4.2.9.7	Ahorro de energía al reducir la demanda artificial.....	106
4.2.9.8	Resumen.....	107
Capítulo 5. Rediseño de la red de aire comprimido		109
5.1	Consideraciones iniciales	110
5.1.1	Equipos de generación.....	110
5.1.2	Material de la tubería y tipos de soportes.....	110
5.2	Consumo de aire comprimido de diseño	111
5.2.1	Demanda de aire comprimido de primario	111
5.2.2	Demanda de aire comprimido de secundario.....	112
5.2.3	Demanda de aire comprimido de rendering	112
5.2.4	Demanda de aire comprimido total de la planta	113
5.3	Diseño de los bajantes de los equipos	114
5.3.1	Diámetro de la tubería de los bajantes.....	115
5.4	Diseño de la tubería principal y anillos	118
5.4.1	Diseño de anillos A.....	119
5.4.2	Diseño de anillos B.....	122
5.4.3	Manifold del cuarto de compresores	123
5.5	Cálculo del volumen del tanque pulmón	125
5.6	Tratamiento de los condensados del cuarto de compresores	126
Capítulo 6. Estudio técnico y financiero del proyecto		129
6.1	Estudio técnico de la red de aire comprimido	130
6.1.1	Ciclo de vida útil de la red actual.....	130
6.1.2	Capacidad de ampliación	131
6.1.3	Confiabilidad del sistema de aire comprimido	132
6.1.4	Consideraciones de Seguridad (EHS).....	134
6.1.5	Estudio financiero de los diseños propuestos.	135
6.1.5.1	Propuesta de Facility & Supply	136
6.1.5.2	Propuesta de KAESER	137
6.1.5.3	Propuesta de ENESA	137
6.1.5.4	Propuesta de Grupo Flotec.....	137
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....		140

7.1 Conclusiones.....	141
7.2 Recomendaciones.....	142
Capítulo 8. Referencias Bibliográficas.....	143
Capítulo 9. Apéndices.....	148
9.1 Auditoria Cuarto de compresores.....	149
9.2 Cotización purga automática.....	150
9.3 Cotización materiales para tubería del secador de aire.....	151
9.4 Cotizaciones ENESA.....	152
9.5 Cotizaciones Facility and Supply.....	153
Diseño A.....	153
Diseño B.....	153
Tanque de almacenamiento.....	153
9.6 Cotizaciones Grupo Flotec.....	154
Diseño A.....	154
Diseño B.....	154
9.7 Cotizaciones KAESER.....	155
Diseño A.....	155
Diseño B.....	155

Figuras

Figura 1. Ubicación planta PIPASA SRL.....	18
Figura 2. Organigrama del departamento de ingeniería y mantenimiento.....	19
Figura 3. Proceso productivo de la planta PIPASA SRL (Cargill) San Rafael.	20
Figura 4. Matriz de costos energéticos para la planta PIPASA SR, Cargill.	27
Figura 5. Composición del aire atmosférico.	33
Figura 6. Márgenes de presión del aire.....	34
Figura 7. Diagrama presión- volumen teórico de trabajo de un compresor ideal. .	35
Figura 8. Diagrama real de trabajo de un compresor y carrera de aspiración e impulsión de un cilindro.....	36
Figura 9. Clasificación de compresores según su principio de funcionamiento. ...	36
Figura 10. Vista de corte de un compresor de tornillo lubricado.....	37
Figura 11. Proceso de compresión de un compresor de tornillo.	38
Figura 12. Tabla de conversión para la tasa de expansión volumétrica.....	40

Figura 13. Clasificación de la calidad del aire según la norma ISO 8573:2010.....	42
Figura 14. Clasificación de la calidad del aire para uso industrial según la norma ISO 8573:2010.	42
Figura 15. Relación entre punto de rocío y punto de rocío a presión.	43
Figura 16. Cambios típicos de los parámetros con la compresión, la refrigeración y el secado con refrigerante.	44
Figura 17. Diagrama general de un sistema de aire comprimido.	46
Figura 18. Nombramiento de tuberías según la conexión y función de estas.	48
Figura 19. Consumo de aire en litros por cm de carrera de un pistón neumático.	49
Figura 20. Consumo de aire de herramientas y máquinas usadas.	50
Figura 21. Factor de simultaneidad según la cantidad de equipos repetidos.	50
Figura 22. Longitud equivalente en metros para accesorios de tuberías.	52
Figura 23. Caída de presión admisible según el tipo de tubería.	53
Figura 24. Nomograma para el dimensionamiento de la tubería de aire comprimido.	54
Figura 25. Herramienta online de KAESER para estimar el volumen del tanque de almacenamiento.	55
Figura 26. Modelo de sistema de gestión para la norma ISO 50001.	56
Figura 27. Estructura de costos de un sistema de aire comprimido durante su vida útil.	58
Figura 28. Estructura de la demanda de aire comprimido.	60
Figura 29. Flujo de aire comprimido a través de un agujero.	62
Figura 30. Descarga de aire comprimido a través de un orificio.	65
Figura 31. Factor de emisión de gases efecto invernadero para el sector energía uso de electricidad.	66
Figura 32. Fórmula de cálculo del indicador financiero VAN.	67
Figura 33. Condiciones ambientales de la zona de Alajuela, aeropuerto Juan Santamaría.	70
Figura 34. Curva de demanda de aire comprimido de la planta para año 2017.	72
Figura 35. Costo debido a las fugas presentes en la red de aire comprimido para el año 2017.	73
Figura 36. Ubicación del cuarto de compresores con respecto al resto de la planta PIPASA SR.	74
Figura 37. Datos de placa del compresor CSD 75.	75
Figura 38. Datos de placa de uno de los compresores ASD 40.	75

Figura 39. Vista isométrica del cuarto de compresores de la planta PIPASA SR.	76
Figura 40. Esquema del circuito interno de refrigeración.	77
Figura 41. Conexión del secador de aire, indicando la correcta disposición de tuberías.	78
Figura 42. Purga manual del tanque de aire comprimido 1, del cuarto de compresores.	78
Figura 43. Datos de placa del filtro F142KE ubicado en el cuarto de compresores.	79
Figura 44. Datos de placa del filtro F142KA ubicado en el cuarto de compresores.	80
Figura 45. Clasificación ISO 8573-1 según la configuración de tratamiento de aire.	81
Figura 46. Cronograma de mantenimiento para compresores Kaeser	82
Figura 47. Presencia de óxido y harina de render en filtro ubicado en el techo de la planta.	83
Figura 48. Registro de presiones de la red de aire comprimido para estimar la caída de presión.	84
Figura 49. Hoja de cálculo para estimar el consumo de aire del blow tank viseras.	85
Figura 50. Demanda de aire comprimido estimada para el área de primario.	86
Figura 51. Demanda de aire comprimido estimada para el área de secundario.	86
Figura 52. Demanda de aire comprimido estimada para el área de rendering.	87
Figura 53. Cuadro resumen de cálculo estimado de aire comprimido de la planta.	87
Figura 54. Gráfica de demanda de aire comprimido, obtenida del equipo de medición SAM KAESER.	88
Figura 55. Evaluación del tramo principal de tubería de la red de aire comprimido.	89
Figura 56. Reporte energético de la semana del 24 al 31 de marzo del sistema de aire comprimido.	91
Figura 57. Costo energético total del sistema de aire comprimido del 24 al 31 de marzo.	92
Figura 58. Estudio de utilización de los compresores instalados del 24 al 31 de marzo.	92
Figura 59. Cuadro resumen del estudio de energía semanal.	93
Figura 60. Cuadro resumen de ahorros del estudio de energía semanal.	94
Figura 61. Costo energético debido a la descarga del blow tank viseras.	95

Figura 62. Unidad de mantenimiento con presencia de condensado.....	96
Figura 63. Indicadores financieros para las mejoras y corrección del secador de aire, del tratamiento de condensados.	98
Figura 64. Tamiz de harina del área de rendering.....	99
Figura 65. Cuadro resumen del costo debido al uso de aire comprimido en el tamiz de harina.	100
Figura 66. Gráfica de consumo de aire comprimido para determinar las pérdidas debido a fugas de la red de aire comprimido.	101
Figura 67. Costo estimado en pérdidas por fugas mediante el consumo mínimo de los domingos.	102
Figura 68. Gráfico de Pareto de las fugas detectadas en la red de aire comprimido.	103
Figura 69. Listado de fugas que representan el 80% de las pérdidas detectadas por fugas en la red.	103
Figura 70. Afectación en el proceso debido al sistema de aire comprimido para el FY1819.....	105
Figura 71. Afectación en el proceso debido al sistema de aire comprimido para el FY1718.....	105
Figura 72. Costo estimado debido a la pérdida de presión en la red.	106
Figura 73. Costo estimado debido a la demanda artificial de aire comprimido. ..	107
Figura 74. Muestra del tipo de soportes para la tubería PREVOST, Grupo Flotec.	110
Figura 75. Demanda de diseño para el área de primario.	111
Figura 76. Demanda de diseño para el área de secundario.....	112
Figura 77. Demanda de diseño para el área de rendering.	113
Figura 78. Demanda de aire comprimido total de la planta y validación de la capacidad instalada de generación de aire comprimido.....	114
Figura 79. Ejemplo del estándar requerido de bajantes en la planta PIPASA SR.	115
Figura 80. Ejemplo de cálculo del diámetro adecuado para la bomba de sangre, mediante el software.	117
Figura 81. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de primario.	117
Figura 82. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de secundario.....	118
Figura 83. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de rendering.	118

Figura 84. Diámetro de las tuberías del anillo P y el tramo hasta el cuarto de compresores.....	119
Figura 85. Muestra del plano correspondiente al Anillo de primario del diseño A.	120
Figura 86. Diámetro de las tuberías del anillo S y el tramo hasta el cuarto de compresores.....	120
Figura 87. Muestra del plano correspondiente al Anillo de secundario del diseño A.	121
Figura 88. Diámetro de las tuberías del anillo R y el tramo hasta el cuarto de compresores.....	121
Figura 89. Muestra del plano correspondiente al Anillo de rendering del diseño A.	122
Figura 90. Diámetro de las tuberías del diseño B y el tramo hasta el cuarto de compresores.....	123
Figura 91. Muestra del plano correspondiente al diseño B.	123
Figura 92. Vista Isométrica del manifold del cuarto de compresores.	124
Figura 93. Diámetro del manifold del cuarto de compresores.	124
Figura 94. Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento mediante la herramienta online de KAESER.	125
Figura 95. Equipo de tratamiento de condensados AQUAMAT.	126
Figura 96. Especificaciones técnicas para la selección del AQUAMAT	127
Figura 97. Cálculo de la tasa de condensación del sistema de aire comprimido de la planta.....	128
Figura 98. Diseño inadecuado de bajante y conexión a equipos del sistema centralizado de aseo, en bodega de químicos.	133

Tablas

Tabla 1. Velocidades recomendadas para los distintos tipos de tubería.....	47
Tabla 2. Datos meteorológicos de la zona de San Rafael de Alajuela.	70
Tabla 3. Tarifa eléctrica MT CNFL para los meses de enero, febrero y marzo del 2019.	90
Tabla 4. Tarifa eléctrica MT CNFL para los meses de abril, mayo y junio del 2019.	90

Tabla 5. Resumen de costos asociados a deficiencias en la red de aire comprimido.....	107
Tabla 6. Reducción en la huella de carbono al corregir las ineficiencias del sistema de aire comprimido actual.	108
Tabla 7. Datos para el cálculo del bajantes hacia la bomba de sangre.....	116
Tabla 8. Ingresos netos para el estudio financiero del proyecto de diseño de la red de aire comprimido.	136
Tabla 10. Cuadro resumen de las cotizaciones propuestas por las cuatro empresas para el proyecto.	138
Tabla 11. Cuadro resumen del estudio financiero en formato Cargill para el diseño A.....	139
Tabla 12. Cuadro resumen del estudio financiero en formato Cargill para el diseño B.....	139

Ecuaciones

Ecuación 1. Conversión de ACFM a SCFM.	39
Ecuación 2. Cálculo del consumo de aire comprimido para pistones de doble efecto.	48
Ecuación 3. Cálculo del flujo de aire comprimido para la selección del compresor.	50
Ecuación 4. Cálculo de la pérdida de presión	51
Ecuación 5. Cálculo del diámetro adecuado según el flujo a través de una tubería.	53
Ecuación 6. Porcentaje de ampliación.	54
Ecuación 7. Estimar porcentaje de fugas, método práctico.....	61
Ecuación 8. Cálculo de la potencia del compresor.....	63
Ecuación 9. Estimación del costo energético del aire comprimido.	63
Ecuación 10. Cálculo del flujo de aire comprimido debido a fugas.....	64
Ecuación 11. Cálculo de costo de una fuga.	64
Ecuación 12. Cálculo de costo de una fuga con el porcentaje de fugas del método práctico.....	65



Capítulo 1. Resumen y reseña de la empresa

1.1 Resumen

En los objetivos de Cargill, la búsqueda de la eficiencia energética de sus procesos es vital y en planta San Rafael, la gerencia está comprometida con lograrlo. Basado en los planes de ampliar y concentrar sus operaciones en la planta, es necesaria la evaluación y mejora de todos los sistemas y servicios industriales disponibles, entre ellos el aire comprimido.

Primeramente, en este proyecto se realizó una evaluación general del sistema de aire comprimido desde su generación en el cuarto de compresores hasta los usuarios finales. Se contempló el uso y consumo del aire comprimido, así como la relación entre energía- producción, mediante un indicador de rendimiento. Además, se realizó la actualización de los planos de la red de tuberías contemplando las modificaciones recientes. Se determinó el consumo de cada equipo y área de la planta de forma teórica y en campo con ayuda del equipo de monitoreo SAM 4.0.

El siguiente paso fue, a partir de la evaluación, recorridos de campos y análisis energético, determinar las oportunidades de mejora que impacten la eficiencia del sistema y ayuden a reducir los costos de operación. Se realizó una auditoría de fugas, la cual arrojó un flujo debido a fugas de 114 cfm y \$9 000 en pérdidas anuales. Entre las fugas más destacadas se encuentran: la eliminación de usos inapropiados, la reducción de la presión y el aumento del volumen de almacenamiento de aire comprimido. Sumadas se tiene una oportunidad de ahorro de alrededor de \$15 000.

Seguidamente, se realizó el diseño de la red de aire comprimido en tubería de aluminio, ya que se determinó la afectación en el proceso productivo y la imposibilidad de ampliar la red. Se diseñaron dos propuestas cumpliendo los requisitos de demanda y un factor del 20% para las futuras ampliaciones.

Mediante un estudio técnico y financiero en el cual se evaluaron cuatro cotizaciones presentadas por empresas del área, se determina la opción más rentable, con un monto de inversión de \$66 000 y un periodo de retorno de 3,1 años, una TIR de 28,1% y un VAN de \$55 000, asegurando la confiabilidad, eficiencia y seguridad de sistema de aire comprimido.

1.2 Palabras clave:

Aire comprimido, ahorro energético, ISO 11011, ISO 8573, rediseño.

1.3 Abstract

In the objectives of Cargill, the search for the energy efficiency of its processes is vital and in the San Rafael plant, management is committed to achieving it. Based on plans to expand and concentrate its operations in the plant, it is necessary to evaluate and improve all available industrial systems and services, including compressed air.

First, a general evaluation of the compressed air system was developed from its generation in the compressor room to the end users. The use and consumption of compressed air was contemplated, as well as the relationship between energy-production, by means of a performance indicator. The updating of the plans of the pipe network was carried out contemplating the recent modifications. The consumption of each equipment and area of the plant was determined theoretically and in the field with the help of the SAM 4.0 monitoring team.

The next step was from the evaluation, field trips and energy analysis to determine the opportunities for improvement that impact the efficiency of the system and help reduce operating costs. A leakage audit was conducted which showed a flow of leaks of 114 cfm and \$ 9,000 in annual losses. The most outstanding are: the elimination of inappropriate uses, the reduction of pressure and the increase in the volume of storage of compressed air. Together you have a savings opportunity of around \$ 15,000.

Next, the design of the compressed air network in aluminum pipe was carried out, since the impact on the production process and the impossibility of expanding the network were determined. Two proposals were designed meeting the demand requirements and a factor of 20% for future expansions.

Through a technical and financial study in which 4 quotes submitted by companies in the area were evaluated, the most profitable option is determined, with an investment amount of \$ 66,000 and a return period of 3.1 years, an IRR of 28, 1% and a NPV of \$ 55,000, ensuring the reliability, efficiency and safety of the compressed air system.

1.4 Keywords:

Air Compressed, Energy saving, ISO 11011, ISO 8573, Redesign.

1.5 Misión

“Crear un valor distintivo”.

1.6 Visión

Como uno de los mayores compradores mundiales de productos agrícolas, nuestro objetivo es ser el líder mundial en nutrición de personas. Cargill se compromete a utilizar nuestro liderazgo en el mercado para promover un entorno saludable y un suministro seguro de alimentos para una población mundial en crecimiento y más afluente. Creemos que los bosques y la agricultura deben coexistir y ambos son cruciales para la vida en el planeta. Los bosques proporcionan alimentos, agua, combustible, medicina y medios de subsistencia a miles de millones de personas, a la vez que proporcionan un hábitat vital, regulan el clima y almacenan carbono para un entorno más amplio. La agricultura es esencial para el sustento de miles de millones de personas y la seguridad alimentaria para todos.

1.7 Descripción de la empresa



Figura 1. Ubicación planta PIPASA SRL.

Fuente: Google Maps (2019).

Cargill es una empresa transnacional de raíces estadounidenses, cuenta con 150 años de experiencia y su negocio se centra en productos alimenticios y de bebidas. Desde sus inicios ha creado lazos con sus clientes y actualmente se ha posicionado en 70 países, empleando alrededor de 155 000 colaboradores.

Dentro de sus objetivos, se encuentra el realizar una producción comprometida con el medio ambiente minimizando su impacto y en busca de mejorar las comunidades en las que se vive y trabaja.

Además, en su cartera de productos se encuentran alimentos de consumo humano y de consumo animal. Se desarrollan programas de asistencia a productores de ganadería y acuicultura con el fin de mejorar la nutrición animal mediante investigación y desarrollo que genera la empresa. Así mismo, se procesan productos cárnicos vacunos, avícolas, productos de huevo, entre otros. Y en EE. UU., Canadá, América Central, China, Sureste de Asia y el Reino Unido, se fabrica sal, la cual se utiliza en distintas áreas.

Para el año 1999, Cargill incursiona en Costa Rica con la compra de la marca Cinta Azul. Una vez posicionada, Cargill inicia la adquisición de más marcas como Zaragoza, Castillo del Roble, Kimby, Premier, Ascan, Mimados, Don Gato, Kan-Kan, Dogui, Gati y Pet Master. En el año 2011 se realiza la adquisición de la planta PIPASA SRL ubicada en San Rafael de Alajuela (Cargill, 2018).

En la planta PIPASA SRL el Departamento de mantenimiento e ingeniería se encuentra organizado como se muestra en la Figura 2.

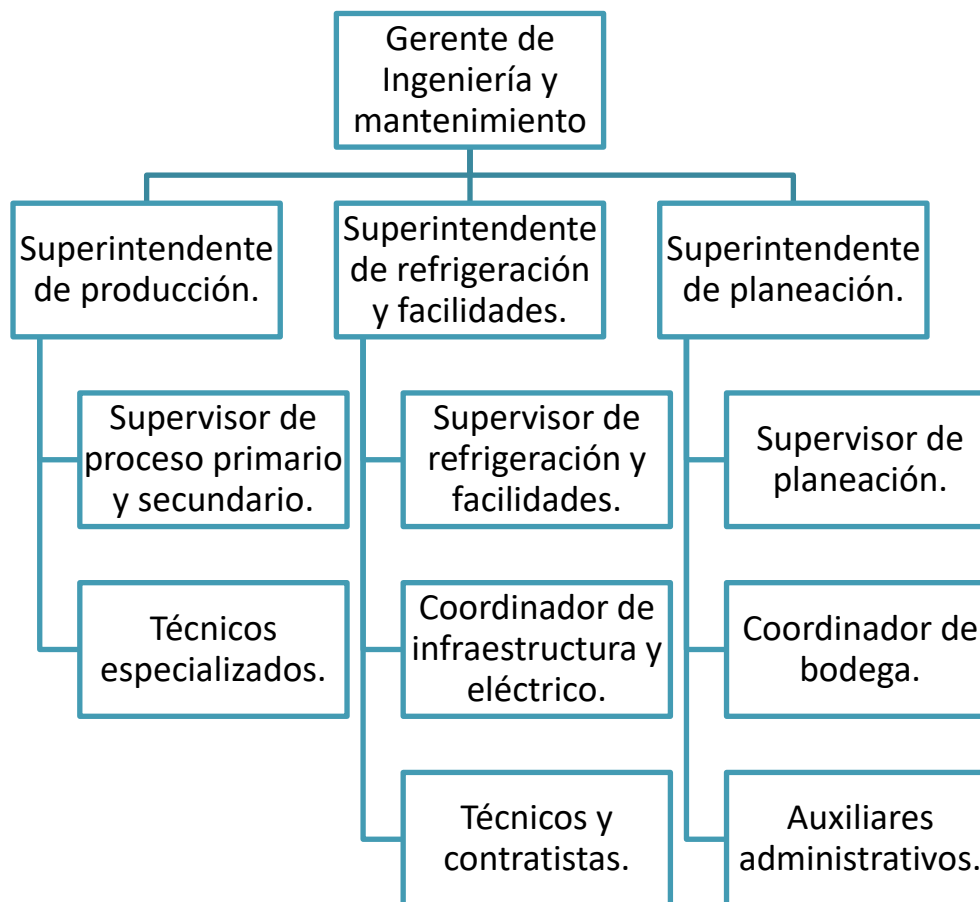


Figura 2. Organigrama del Departamento de ingeniería y mantenimiento.

Fuente: elaboración propia (2018).

1.8 Descripción del proceso productivo

Como se muestra en la Figura 3, el proceso productivo inicia con la llegada de las aves a la planta, ahí se climatizan y se preparan para ingresar. Se colocan de cabeza en una serie de soportes montados en una cadena que los transporta por cada una de las etapas del proceso.

Primeramente, se realiza el sacrificio de las aves aturdiéndolas con un choque eléctrico y realizando un corte en la yugular; después, se procede con el desangrado. Se continúa con el escaldado donde se sumergen en agua caliente para limpiarlas y eliminar suciedad, luego se despluman y se cortan la patas. Mediante un equipo llamado módulo maestro, se realiza el vaciado interno de las aves. Se pesan en una romana y cuando se cumple con 65 kg se avanza hacia el preenfriamiento y luego al enfriamiento, en el cual se llevan los pollos a una temperatura que evita la formación de bacterias (alrededor de 5°C). En el proceso secundario se realiza el corte final, ya sea en cuarto, muslo, pechuga, entre otros y, finalmente, se empaca y se almacena en refrigeración o en congelación para posteriormente ser transportado al CEDI metropolitano.

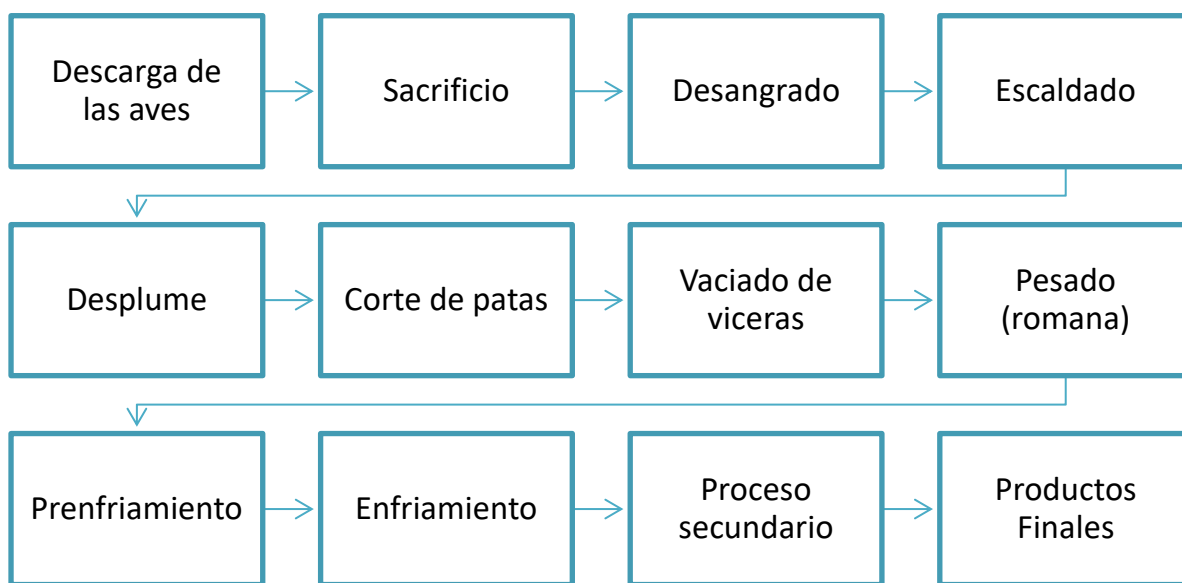


Figura 3. Proceso productivo de la planta PIPASA SRL (Cargill) San Rafael.

Fuente: elaboración propia, (2018).



Capítulo 2. Descripción del proyecto

2.1 Introducción

Dadas las condiciones actuales del planeta en cuanto al cambio climático, el tema de ahorro energético cobra gran valor en las industrias, debido al impacto ambiental y económico; mediante este proyecto se pretende elaborar un estudio energético y financiero del sistema de aire comprimido de la planta PIPASA SRL (Cargill) ubicada en San Rafael de Alajuela, con el fin de determinar la viabilidad de invertir en un rediseño del sistema. Para llevar a cabo el proyecto se debe generar la información suficiente en cuanto al costo energético debido a fugas, al costo debido a paros de producción por fallos en el sistema, la capacidad de generación de aire comprimido versus el consumo de los equipos, el estado físico de la tubería y la capacidad de ampliación, y a partir de estos resultados justificar financieramente la inversión del proyecto.

Las etapas del proyecto consisten en diagnosticar la situación actual del sistema con ayuda de la norma UNE- EN ISO 11011 para auditarlo; proponer un rediseño del sistema pensando en ahorro energético y minimizar las pérdidas por fugas o caídas de presión. Se tomarán las herramientas de la norma ISO 50001 para sistemas de gestión de energía, con el fin de generar un indicador energético que impulse a la organización a la mejora continua del sistema de aire comprimido tomando acciones sobre las oportunidades de mejora y las oportunidades de conservación de la energía (OCE's).

Finalmente, mediante un estudio financiero y apoyado con indicadores como el VAN y la TIR, se determinará la viabilidad del proyecto y el periodo de recuperación de la inversión, contemplando los costos asociados a la red actual y comparándolos con la inversión necesaria para realizar el diseño propuesto.

2.2 Planteamiento del problema

Actualmente el sistema de aire comprimido se encuentra dentro de los objetivos de la gerencia para tomar acciones debido al desconocimiento de la instalación actual. Por lo cual se desea iniciar con la evaluación de la red para establecer indicadores económicos, energéticos y productivos que demuestren el estado actual del sistema de aire comprimido.

Con el paso de los años, la planta ha sufrido una serie de modificaciones y ampliaciones, las cuales han incurrido en cambio de equipos, adquisición de nuevos equipos, instalación de nuevas tuberías, instalación de un tanque pulmón adicional, entre otros. Además, se realizó un estudio por parte de la empresa proveedora de Kaeser en el 2015 para la instalación de un compresor nuevo según la demanda de ese periodo de medición. En la actualidad no se conoce información sobre los equipos conectados a la red de aire comprimido.

El Departamento de Ingeniería y Mantenimiento desconoce sobre la red de aire comprimido: su antigüedad, la capacidad instalada, la demanda del sistema actual, la curva de demanda horaria actual después de la adquisición del compresor, el consumo energético y la distribución de tuberías en la planta, ya que los planos están desactualizados. No se tienen establecidos los parámetros de funcionamiento de los equipos que consumen aire comprimido, tampoco están identificadas las tuberías, válvulas, accesorios ni a qué equipo se dirige cada tubería, además, no se cumple con el código de colores.

Otro de los problemas presentes es la formación de agua por condensación en la tubería (a pesar de contar con un secador de aire), lo cual afecta el funcionamiento de los equipos, principalmente pistones neumáticos, lo que genera un costo de mantenimiento alto.

Mediante un análisis ingenieril que abarque índices financieros, energéticos y productivos, se busca evidenciar las deficiencias del sistema con miras a tomar acciones que mejoren el rendimiento de la red y generen mayor rentabilidad al negocio, justificando a la gerencia la inversión que se debe realizar.

2.3 Objetivo general

Desarrollar un estudio técnico, energético y financiero para el sistema de aire comprimido, a través de herramientas de la norma ISO 50001, en la planta PIPASA SRL (Cargill) en San Rafael de Alajuela.

2.4 Objetivos específicos

1. Diagnosticar la situación actual del sistema de aire comprimido de la planta desde la generación, tratamiento y calidad del aire, red de tuberías y consumo de energía.
2. Determinar las oportunidades de mejora del sistema de aire comprimido que permitan la reducción en los costos energéticos y maximicen la eficiencia.
3. Elaborar una propuesta de rediseño de la red de aire comprimido que satisfaga los requerimientos de calidad de la ISO 8573.1, tomando en cuenta los hallazgos del objetivo específico uno.
4. Comparar mediante indicadores técnicos, energéticos y financieros, el sistema actual de aire comprimido y la propuesta de rediseño para la determinación de la viabilidad del proyecto.

2.5 Metodología

Para cumplir los objetivos planteados en el proyecto, se debe iniciar con el estudio de la situación actual, caracterizar el sistema de aire comprimido en su totalidad en cuanto a los aspectos físicos (cuarto de máquinas, tuberías, accesorios y equipos) y las variables de medición para determinar el rendimiento y eficiencia del sistema. A continuación, se enumeran los pasos por seguir para desarrollar el proyecto:

1. El primer paso es la instalación del equipo de medición del que dispone la empresa para iniciar con el proceso de adquisición de datos.
2. Apoyado en la norma UNE- EN ISO 11011:2013, realizar el diagnóstico del sistema actual de aire comprimido, levantamiento del listado de equipos con sus respectivos parámetros de funcionamiento, distribución de tuberías con sus dimensiones físicas y accesorios. Además, determinar las oportunidades de mejora para el sistema de aire comprimido con el fin de reducir los costos operativos.

Lista de actividades:

- a. Generar el listado de equipos que consumen aire comprimido, identificando sus parámetros de funcionamiento como el consumo de aire comprimido, presión de trabajo, calidad de aire, nivel de lubricación, entre otros. Además de los periodos de funcionamiento durante el proceso productivo.
 - b. Realizar el levantamiento de la distribución de las tuberías que recorren la planta para generar los planos del sistema actual. Determinar los accesorios de la red y realizar el respectivo rotulado e identificación.
 - c. Determinar el porcentaje de fugas actual y las pérdidas energéticas del sistema, así como calcular el costo económico asociado.
 - d. Identificar las oportunidades de mejora que reduzcan los costos operativos.
3. Una vez realizado el diagnóstico del sistema de aire comprimido actual, se procederá a plantear un rediseño de la red, el cual involucre los hallazgos del

paso anterior. Para lograr este objetivo se deben realizar los siguientes pasos:

- a. Ubicar cada equipo que utilice aire comprimido mediante una distribución de planta. Para ello se deben realizar los planos detallados.
 - b. Determinar el consumo de aire requerido en cada punto de la planta para cada equipo.
 - c. Determinar la presión de trabajo de cada equipo y cada toma de aire comprimido.
 - d. Establecer el requerimiento de lubricación, calidad de aire y porcentaje de humedad de cada equipo.
 - e. Generar un gráfico de consumo horario de aire comprimido.
 - f. Determinar el porcentaje de sobre diseño del sistema para futuras ampliaciones.
 - g. Determinar las dimensiones requeridas de la tubería y porcentaje de fugas en cada punto alrededor de la planta.
 - h. Seleccionar los equipos de generación y auxiliares necesarios para el diseño propuesto, en caso de requerirse.
4. Realizar el estudio técnico y financiero que permita comparar el sistema actual con la propuesta de diseño del sistema de aire comprimido para evaluar la viabilidad del proyecto, tomando en cuenta las ampliaciones futuras, la vida útil remanente de la red actual, el costo de oportunidad debido a paros y el costo de las pérdidas del sistema actual.
 5. Desarrollo de conclusiones y recomendaciones relacionadas con los hallazgos y resultados del proyecto.

2.6 Justificación

La eficiencia energética es un pilar importante en el desarrollo de cualquier actividad industrial, ya que, como política país, Costa Rica busca para el 2030 un nivel superior en cuanto a eficiencia energética, tanto en lo que respecta al consumo de energía como a su generación, transmisión y distribución (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], 2015), esto conlleva a una reducción de las emisiones de dióxido de carbono, es ahí donde se extiende la relevancia ambiental y el compromiso con el ambiente de Cargill al reducir su consumo energético.

En la planta PIPASA SR de Cargill su matriz de costos energéticos para el año 2017 se componía de un 54% electricidad, 46% búnker y cerca de un 0% gas licuado de petróleo, como se muestra en la

Figura 4.

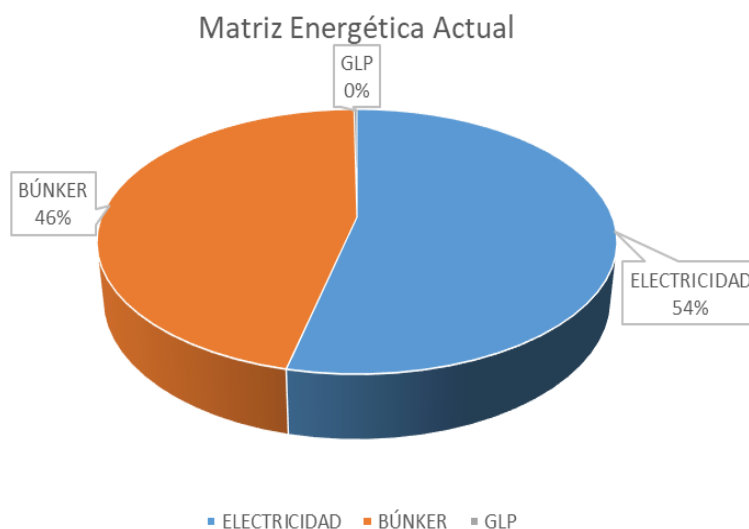


Figura 4. Matriz de costos energéticos para la planta PIPASA SR, Cargill.

Fuente: Romero (2018).

En el año 2018 se realizó un estudio para sustituir el búnker por biomasa y se planteó que la matriz energética de la planta pasaría a ser: 74% electricidad, 25% biomasa, 1% búnker y 0% gas lp. La facturación energética por electricidad en ambos casos representa el mayor monto, el cual en promedio para el año 2018 fue de 96 millones de colones por mes.

Como parte de las actividades industriales, el aire comprimido se ha convertido en un servicio, así como el agua, la electricidad y el combustible, por lo que su control y uso eficiente conlleva a un gran impacto en los presupuestos de las empresas. Un desconocimiento del impacto de este sistema de aire comprimido en la factura eléctrica provoca que se generen vicios de mantenimiento en cuanto al uso adecuado del aire comprimido, donde el motor del compresor generalmente es uno de los de mayor potencia en la empresa (Cárdenas, 2009).

En forma estadística y de acuerdo con distintos autores y fabricantes, las pérdidas por la instalación neumática, pérdidas de presión, fugas de aire, falta de control en la generación o una sobrecompresión rondan el 30% de costo energético en las industrias en general. Dadas estas razones, durante la vida útil del compresor los costos energéticos terminan superando la inversión inicial (Torrent, 2014). Dado que los costos de operación y mantenimiento superan la inversión inicial, la estructura de precios del producto final se ve afectada por los altos montos energéticos, sumado a eso, el costo de oportunidad debido a los paros por fallas en la red de aire comprimido implica para Cargill un paro total o parcial de la planta.

La situación actual de la red de aire comprimido es incierta debido al desconocimiento del sistema, se desconoce el impacto del sistema de aire comprimido en la rentabilidad del negocio, por lo tanto, no se sabe si se incurre en grandes desperdicios de energía y dinero en aire. Carecen de planos actualizados, las tuberías no están identificadas como lo estipula el decreto N°12715- MEIC, lo que conlleva a un riesgo para la salud de las personas al intervenir una tubería de la cual se desconoce el fluido que transporta. Así mismo, se realizaron modificaciones sin estudios ingenieriles, por lo tanto, se desconocen los parámetros de funcionamiento de la red y la capacidad máxima de flujo, además, no se cuenta con un estándar de accesorios, por lo cual el *stock* de repuestos es más amplio.

Dichas deficiencias conllevan a riesgos en la pérdida de producción, debido a la fragilidad del sistema actual. Además, Cargill pretende expandir las instalaciones y el consumo de aire comprimido también crecerá, por lo tanto, es necesaria la evaluación de la red actual.

El objetivo que se desea alcanzar es un sistema de aire comprimido eficiente, seguro y confiable, el cual permita hacer más competitiva a la empresa. Se busca generar los planos actualizados, la identificación de los accesorios y tuberías, determinar los usuarios y su consumo, además de minimizar los riesgos a la salud humana. Se pretende generar un diseño del sistema que permita el uso eficiente, minimizando la cantidad de accesorios y reduciendo la caída de presión, con el fin de reducir los costos operativos, que según estudios tienden a ser el 80% de los costos durante su vida útil (Beko, 2010). Mediante un sistema de monitoreo se pretende implementar industria 4.0 y generar datos para analizar el comportamiento del sistema en tiempo real, esto con la ayuda del Sigma Air Manager 4.0 (SAM 4.0) de Kaeser.

Se debe cumplir con la norma ISO 8573-1 para la calidad del aire, con el fin de reducir los fallos en equipos debido al tratamiento de este y cumplir con la política de calidad e inocuidad del proceso productivo de la planta. Además de referirse a la norma ISO 50001 como herramienta de un modelo de gestión de energía que permita en un futuro generar información suficiente para implementar dicha norma y a la UNE- EN ISO 11011, para evaluar el sistema de aire comprimido actual de la planta e identificar las oportunidades de mejora.

2.7 Viabilidad

Con respecto a la disponibilidad de información de la empresa, se contó con una base de datos del Departamento de Ingeniería y Mantenimiento, a la cual se tendrá acceso, además de la colaboración de los supervisores y superintendentes de mantenimiento. La información técnica se encuentra en las bases de datos del Tecnológico de Costa Rica. Además, se cuenta con las normas ISO necesarias para realizar el proyecto: ISO 8573, ISO 50001 y UNE- EN ISO 11011.

La disponibilidad tecnológica en el mercado es muy amplia y diversa, por lo que se cuenta con los recursos tecnológicos para realizar el proyecto. Además, la empresa posee un equipo de monitoreo Kaeser para el cuarto de compresores que está por instalar, con el cual se realizará la cuantificación de energía y consumo de aire comprimido.

Se cuenta con el recurso humano disponible en caso de necesitarse, como personal de mantenimiento para el apoyo de las tareas por realizar, también con las capacitaciones de seguridad, apoyo para ingresar a sitios confinados, autorización y compañía para ingresar a zonas restringidas. El equipo de técnicos de mantenimiento está disponible para tomar las acciones que generen ahorros rápidos.

En caso de necesitarse, existen empresas nacionales especializadas en auditar sistemas de aire comprimido, a las cuales se les puede solicitar información, como el caso de Central de mangueras y Enesa. Se cuenta, además, con el servicio de tecnologías predictivas para realizar un estudio de fugas en la red.

La empresa posee un listado de proveedores y contratistas en caso de requerirse cotizaciones o mejoras en el sistema, como, por ejemplo: ENESA, Grupo Flotec, Facility & Supply, Kaeser, entre otras.

En el ámbito de la disponibilidad financiera, se definirá en el transcurso del proyecto, debido a la dependencia de los resultados técnicos, energéticos y a la viabilidad financiera del mismo.

2.8 Alcance

Este proyecto tiene la finalidad de impactar directamente al negocio, volviéndolo más rentable al reducir los costos operativos del sistema de aire comprimido, se proponen indicadores de manera que se genere valor agregado al estar en un proceso de mejora continua y de monitoreo de parámetros. Con este proyecto se busca mejorar la eficiencia del sistema de aire comprimido mediante normas ISO como base para generar indicadores energéticos que evidencien la situación actual y permitan reducir costos energéticos, así como pérdidas en la red, además de tomar acciones inmediatas al obtener desviación en los datos.

En cuanto al alcance, en el proceso productivo se busca minimizar los paros, ineficiencia debido a pérdidas de presión y el tiempo de reparación de las averías producidas por fallos en el sistema de aire comprimido, ya que esto conlleva a pérdidas en producto que no fue procesado o a realizar retrabajos en producto que no pasa el control de calidad, además que se atrasa el plan de producción. Otro

impacto del proyecto radica en invertir en un rediseño, el cual eliminará las pérdidas e ineficiencias del sistema de aire comprimido actual, recuperando la inversión en un tiempo razonable.

2.9 Limitaciones

La primera limitante que se presenta es el desconocimiento del sistema de aire comprimido por parte de la empresa, ya que no se cuenta con datos y estos deben generarse durante el desarrollo del proyecto mediante el equipo de medición SIGMA AIR MANAGER 4.0, el cual se instaló durante el desarrollo de la investigación.

Otra limitante es el acceso a todo el recorrido de la tubería de aire comprimido, ya que se encuentra en lugares confinados, entre cielos, paredes y recorren la planta junto con tuberías de agua, tubería EMT de la instalación eléctrica, entre otras. Para obtener el acceso se debe completar la capacitación de espacios confinados y altura, impartida por parte del personal EHS de Cargill.

Se prevé que los equipos no cuenten con sus datos de placa, debido a la antigüedad, procedimientos de mantenimiento y limpieza o producto de la suciedad del proceso, por lo que será una limitante el determinar sus parámetros de funcionamiento.

Por su parte, el rediseño del sistema de aire comprimido se ve limitado por el espacio físico en cuarto de máquinas en la planta y un factor importante es que el rediseño debe ser planeado de tal forma que, si se llega a ejecutar, pueda construirse sin afectar el proceso productivo.

Además, la empresa no cuenta con equipo de medición por ultrasonido, por lo tanto, una limitante es conseguir el presupuesto para contratar el servicio de medición, sin embargo, existen métodos indirectos, por presiones o por medio del SAM 4.0 para estimar el porcentaje de fugas.



Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Definición y conceptos relacionados con el aire comprimido

El sistema de aire comprimido, como todo sistema, requiere de un insumo o materia prima, en este caso es el aire ambiente, el cual está compuesto, principalmente, por 78% nitrógeno, 21% oxígeno, 1% de otros gases nobles y partículas de contaminación. La manera de pasar de aire ambiente a aire comprimido es mediante un proceso termodinámico donde se reduce el volumen y, por consiguiente, aumenta su presión y temperatura. Este proceso se lleva a cabo mediante un compresor (Garro, 2017).

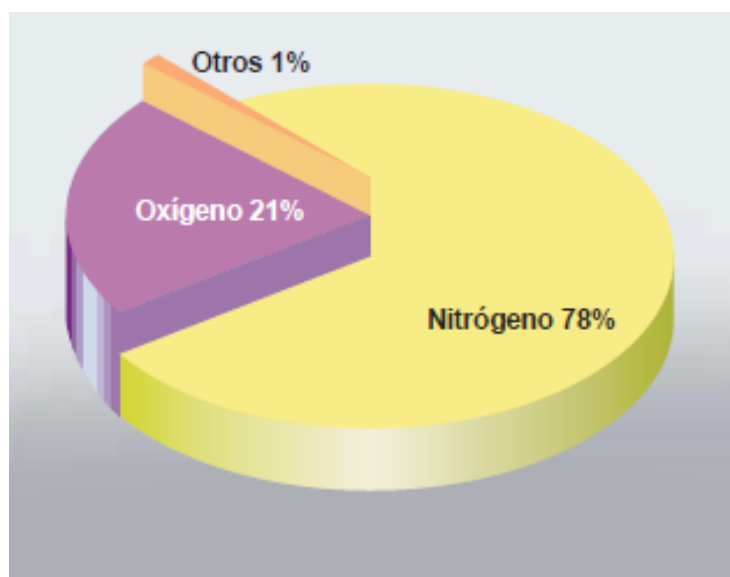


Figura 5. Composición del aire atmosférico.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

3.2 Concepto de presión

El término de presión en la física se relaciona con la fuerza aplicada sobre una superficie. Entre los márgenes de presión existentes se encuentran la presión atmosférica estándar y local, absoluta, diferencial, sobre presión, vacío, presión de flujo y dinámica. En la Figura 6 se presentan los distintos márgenes de presión de forma gráfica.

Bonilla (2014) brinda las siguientes definiciones de los distintos márgenes de presión:

Presión atmosférica estándar: es la presión medida al nivel del mar, es un valor estándar o fijo de magnitud $10,13 \times 10^4$ Pa.

Presión atmosférica local: también se conoce como presión barométrica, es la presión atmosférica de un lugar específico, ya que esta disminuye conforme se aumenta la altura con respecto al nivel del mar. Generalmente se desprecia o se entiende como valor cero.

Presión de vacío: este margen de presión corresponde a una magnitud por debajo de la presión barométrica. La magnitud se representa como un valor negativo.

Presión manométrica o sobrepresión: corresponde a cualquier valor de presión por encima de la presión barométrica.

Presión diferencial: es el resultado de la resta de dos magnitudes de presión manométrica.

Presión absoluta: se refiere a la suma de la presión barométrica y el valor de sobrepresión. (p.19)

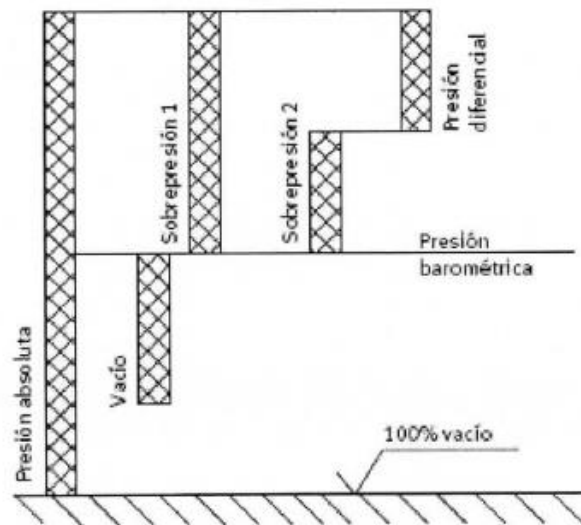


Figura 6. Márgenes de presión del aire.

Fuente: Garro (2017).

Un concepto importante en los sistemas de aire comprimido es que: “La suma de presión estática y presión dinámica siempre es igual y corresponde a la presión

estática del fluido inmóvil” (Garro, 2017,p.8). Siendo la presión estática la presión del fluido inmóvil y la presión dinámica debido al movimiento del fluido.

3.3 Compresores

Como se mencionó anteriormente, el componente encargado de realizar el trabajo para elevar la presión de aire atmosférico es el compresor. Este trabajo está relacionado con el ciclo térmico de compresión, donde se reduce el volumen del aire y este se comprime aumentando su presión y temperatura; en la Figura 7 se muestra el diagrama presión- volumen donde se pueden identificar las siguientes etapas (Carnicer, 1994):

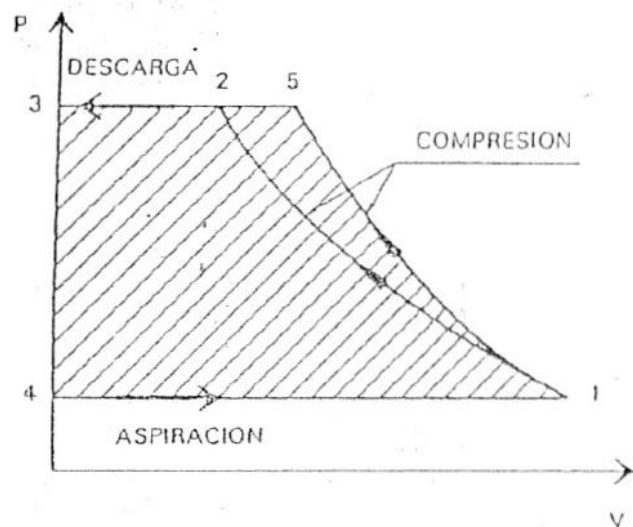


Figura 7. Diagrama presión- volumen teórico de trabajo de un compresor ideal.

Fuente: Carnicer (1994)

1. De 4 a 1 se da un aumento en el volumen a presión constante.
2. De 1 a 2 la presión aumenta debido a la disminución del volumen.
3. De 2 a 3 se disminuye el volumen a presión constante.
4. De 3 a 4 se disminuye la presión a volumen constante.

Es importante notar que, en este caso, es el modelo propuesto para una situación ideal, en la Figura 8 se muestra en el caso real de un compresor de pistón.

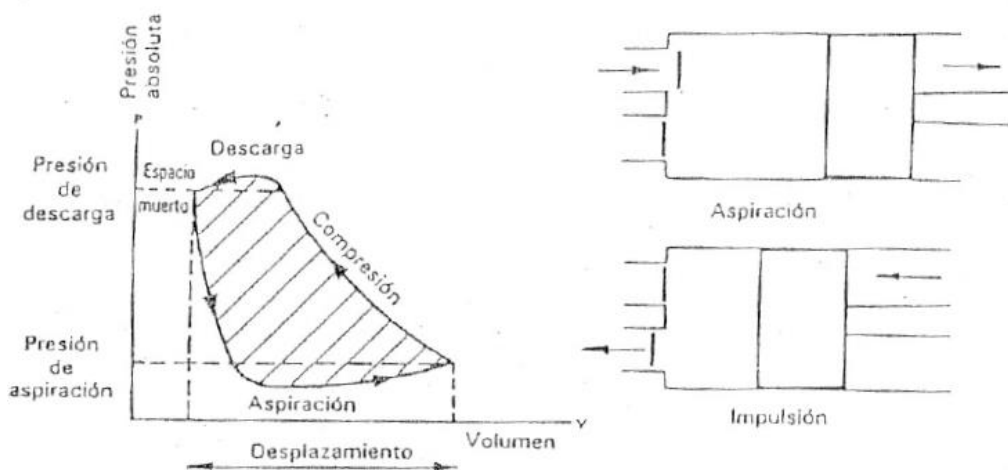


Figura 8. Diagrama real de trabajo de un compresor y carrera de aspiración e impulsión de un cilindro.

Fuente: Carnicer (1994).

Estos equipos se clasifican en compresores de desplazamiento positivo y desplazamiento variable o dinámicos. En la Figura 9 se muestran los tipos de compresores según su principio de funcionamiento.

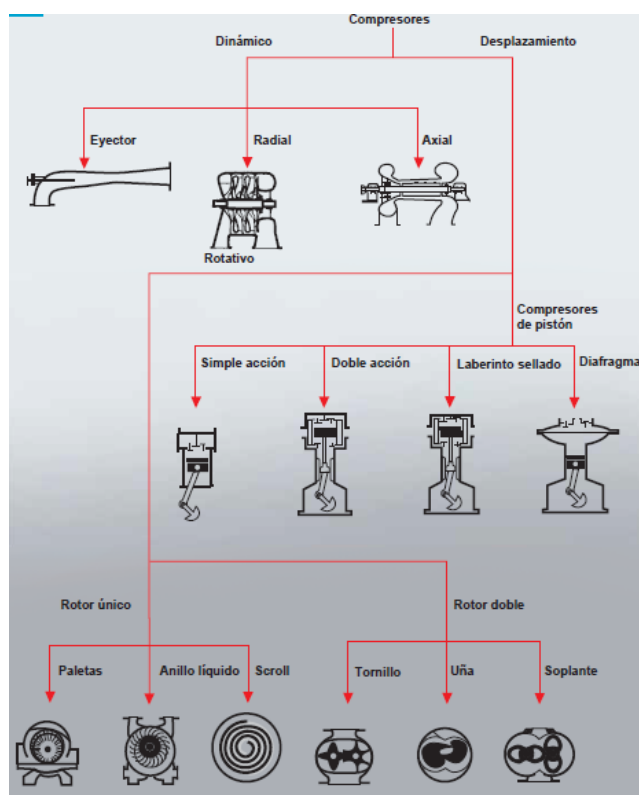


Figura 9. Clasificación de compresores según su principio de funcionamiento.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

El tipo de compresor más utilizado a nivel industrial es el de tornillo, esto se debe a que posee una alta tasa de compresión y es capaz de manejar grandes caudales de aire. Este tipo de compresores, como su nombre lo indica, está compuesto por dos tornillos, uno macho y uno hembra, como se logra ver en la Figura 10, donde al girar juntos poseen una gran cavidad a la entrada y reducen el volumen a la salida (Solano, 2017).

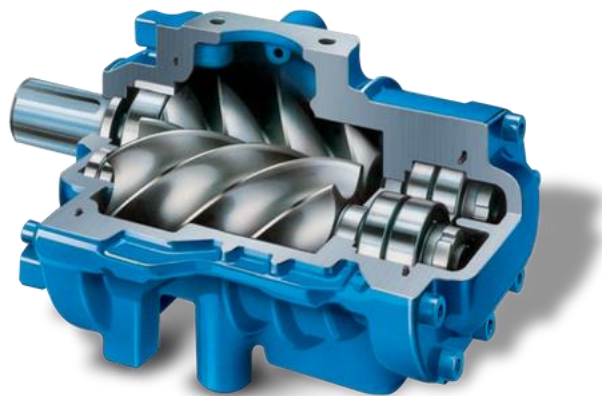


Figura 10. Vista de corte de un compresor de tornillo lubricado.

Fuente: BOGE compressed air systems (s.f.).

El proceso de compresión de un compresor de tornillo está conformado por tres etapas (BOGE compressed air systems, s.f.):

- 1. Aspiración:** el aire entra a través de la abertura de alimentación en los filetes abiertos de los rotores del lado de aspiración.
- 2. Compresión:** por medio del giro progresivo de los rotores se cierra el agujero de entrada de aire. El volumen en las cámaras se reduce y la presión aumenta. Durante esta operación se inyecta aceite que lubrica los cojinetes de los rotores, obtura ranuras y evacua el calor de compresión.
- 3. Salida:** la compresión ha terminado, se alcanzó la presión final e inicia la salida.

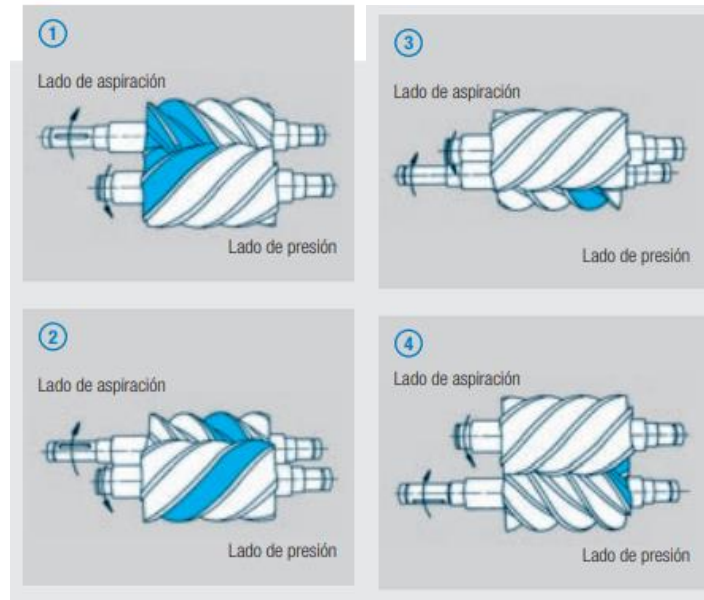


Figura 11. Proceso de compresión de un compresor de tornillo.

Fuente: BOGE compressed air systems (s.f.).

Para la selección del compresor se debe considerar (Garro, 2017):

- Requerimientos de potencia.
- Confiabilidad.
- Espacio disponible en sitio.
- Control de capacidad (variaciones en la demanda).
- Calidad del aire (libre de aceite).
- Costo del aire (tomando en cuenta el costo de parada de producción).
- Factor de carga.
- Número de máquinas.

3.4 Humedad

El concepto de humedad está relacionado con una mezcla de aire seco y vapor de agua. Esta mezcla se da en cantidades limitadas de vapor de agua, es decir, hasta el punto de saturación, el cual depende de la presión barométrica y la temperatura. De tal forma que, si el aire se enfría, se sobresatura la mezcla, el agua se condensa y se vuelve líquido (Garro, 2017).

3.5 Punto de rocío

La temperatura a la cual el aire se encuentra completamente saturado (100% de humedad) se llama punto de rocío, si esta temperatura baja, el agua se condensa (Atlas Copo Airpower NV, 2011). Se le da ese nombre debido a que en las tablas termodinámicas del aire corresponde a un punto de presión y temperatura definido donde el agua mezclada en el aire seco se condensa (Garro, 2017).

- A mayor temperatura, mayor es la capacidad del aire de retener agua.
- Cuanto más alta es la presión, menos humedad contiene el aire.

3.6 Flujo de aire comprimido y su conversión

Dado que el aire es un fluido compresible, su volumen cambia con la presión, por lo tanto, su flujo volumétrico se ve afectado por los cambios en esta. Para sumar caudales a distintas presiones, se debe convertir ese flujo en su equivalente a una presión en común con los demás o se puede incurrir en un error grave para determinar el flujo requerido o entregado por el compresor. En la Ecuación 1 se muestra cómo realizar dicha conversión (Torres, 2015).

$$ACFM = SCFM * \frac{P_{std}}{P_1 - (P_{sat1} * \phi_1)} * \frac{T_1}{T_{std}}$$

Ecuación 1. Conversión de ACFM a SCFM.

Fuente: Torres (2015).

ACFM: Actual cubic feet per minute, Pies cúbicos por minuto actuales.

Φ1: Humedad relativa [%].

Pstd: Presión estándar [psia].

P1: Presión de la zona [psia].

Psat1: Presión de saturación del vapor de agua de la zona [psia].

T1: Temperatura ambiente de la zona [°R].

Tstd: Temperatura estándar [°R].

Nota: todas las unidades de la Ecuación 1 son absolutas.

Otro método para realizar la conversión de ACFM a SCFM es mediante tablas donde, a partir de la presión del lugar, se multiplica por un factor el valor respectivo

ya sea para convertir de ACFM a SCFM o viceversa (Squire Cogswell Aeros Instruments, Inc., s.f.).

Pressure (psia)	Volume Expansion Ratio	
	SCFM to ACFM	ACFM to SCFM
14.70	1.151	0.869
14.50	1.168	0.856
14.25	1.190	0.840
14.00	1.213	0.824
13.75	1.237	0.809
13.50	1.261	0.793
13.25	1.287	0.777
13.00	1.314	0.761
12.75	1.341	0.745
12.50	1.371	0.730
12.25	1.401	0.714
12.00	1.433	0.698
11.75	1.466	0.682
11.50	1.500	0.666
11.25	1.537	0.651
11.00	1.575	0.635
10.75	1.615	0.619
10.50	1.658	0.603
10.25	1.702	0.588
10.00	1.749	0.572
9.75	1.799	0.556
9.50	1.851	0.540
9.25	1.907	0.524
9.00	1.966	0.509
8.75	2.029	0.493
8.50	2.097	0.477
8.25	2.168	0.461

Figura 12. Tabla de conversión para la tasa de expansión volumétrica.

Fuente: Squire Cogswell Aeros Instruments, Inc. (s.f.).

3.7 Calidad del aire comprimido según la ISO 8573:2010

Cuando se trata de calidad del aire comprimido, se refiere a cuáles son las especificaciones que debe cumplir el aire con el fin de que sea apto para el equipo o proceso. Estas especificaciones se han normado en la ISO 8573-1:2010 Compressed air (International Organization for Standardization, 2010) y, por lo general, cada fabricante define la calidad necesaria para su equipo.

En la Figura 14 se muestra parte de dicha clasificación para usos industriales y en la Figura 13 se muestra la clasificación de forma general para el número de partículas, agua y aceite según se requiera (Garro, 2017).

La clasificación ISO para la calidad del aire corresponde a una clase representada por tres números, el primero hace referencia al tamaño y cantidad de partículas por metro cúbico, el segundo a la cantidad de agua y el último a la cantidad de aceite permisible, a modo de ejemplo se tiene:

Clase 1.2.1: esta clasificación representa que, en el caso de partículas (clase 1), por cada metro cúbico de aire comprimido, el máximo de partículas es de 20 000 de 0,1 a 0,5 micras, 400 partículas de 0,5 a 1 micra y 10 partículas de 1 a 5 micras. En el caso de agua (clase 2), se requiere un punto de rocío a presión de -40 °C como máximo y no se permite agua líquida. Para aceite (clase 1), no se permite más de 0.01 mg de aceite líquido, aerosoles de aceite y vapores de aceite (FESTO, 2013).

Clases de calidad del aire comprimido según ISO 8573-1:2010

ISO 8573-1:2010	Partículas sólidas			Concentración másica mg/m ³	Agua		Aceite
	Cantidad máx. de partículas por m ³				Punto de condensación bajo presión de vapor °C	Líquido g/m ³	Contenido total en aceite (líquido, aerosol y niebla) mg/m ³
	0,1 ... 0,5 µm	0,5 ... 1 µm	1 ... 5 µm				
0	Según la definición del usuario del equipo, exigencias más elevadas que en la clase 1						
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	–	≤ -70	–	0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	–	≤ -40	–	0,1
3	–	≤ 90.000	≤ 1.000	–	≤ -20	–	1
4	–	–	≤ 10.000	–	≤ +3	–	5
5	–	–	≤ 100.000	–	≤ +7	–	–
6	–	–	–	≤ 5	≤ +10	–	–
7	–	–	–	5 ... 10	–	≤ 0,5	–
8	–	–	–	–	–	0,5 ... 5	–
9	–	–	–	–	–	5 ... 10	–
X	–	–	–	> 10	–	>10	>10

Figura 13. Clasificación de la calidad del aire según la norma ISO 8573:2010.

Fuente: FESTO (2013).

Clasificaciones industriales de IR

Clase	Descripción	Aplicaciones
IN1 Aire para instrumentos: ISO 1.1.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 1.	Instrumentación, proceso, petróleo y gas, química, electrónica
IN1 inodoro Aire para instrumentos: ISO 1.1.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 1.	Farmacéutica, alimentos y bebidas, estancias limpias
IN2 Aire para instrumentos: ISO 1.2.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 2.	Instrumentación, proceso, petróleo y gas, química, electrónica
IN2 inodoro Aire para instrumentos: ISO 1.2.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 2.	Farmacéutica, alimentos y bebidas, estancias limpias
IG4 Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.4.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 4 o una Humedad Relativa (HR) del 30% (o inferior).	Fabricación general, troquelado de metales, herramientas neumáticas, estampación, montaje, pintura y acabado
IG4 inodoro Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.4.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 4 o una Humedad Relativa (HR) del 30% (o inferior).	Alimentos y bebidas, mezcla de materias primas
IG6 Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.6.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 6 o una Humedad Relativa (HR) del 50% (o inferior).	Aspersión de arena, uso doméstico, construcción

Figura 14. Clasificación de la calidad del aire para uso industrial según la norma ISO 8573:2010.

Fuente: Garro (2017).

3.8 Tratamiento del aire comprimido

El aire comprimido debe ser tratado adecuadamente para eliminar sus contaminantes, los cuales pueden generar problemas como los siguientes (Solano, 2017):

- a. Corrosión en el interior de las tuberías metálicas.

- b. Reducción en la eficiencia de la función de los equipos.
- c. Reducir la vida útil de los equipos neumáticos.
- d. Afectar la medición de los equipos de control o monitoreo.

Etapas del tratamiento del aire:

1. Secado.
2. Filtrado de partículas y aceite.

El secado del aire es el equipo encargado de minimizar la humedad del mismo. Por su parte, el principio físico detrás del secado del aire es el punto de rocío y como varía con la temperatura y la presión, para ellos se utilizan las tablas y diagramas termodinámicos de aire, como la de la Figura 15. Como ya se mencionó anteriormente, el aire atmosférico posee humedad y al bajar la temperatura se condensa generando un contaminante en la red que puede afectar los equipos, tuberías, accesorios y en el peor de los casos, el producto. Para evitar dicha situación, se utiliza un equipo llamado secador de aire, el cual cumple la función de minimizar la humedad ingresada al sistema al enfriar intencionalmente el aire, para posteriormente drenarlo del sistema (Carnicer, 1994).

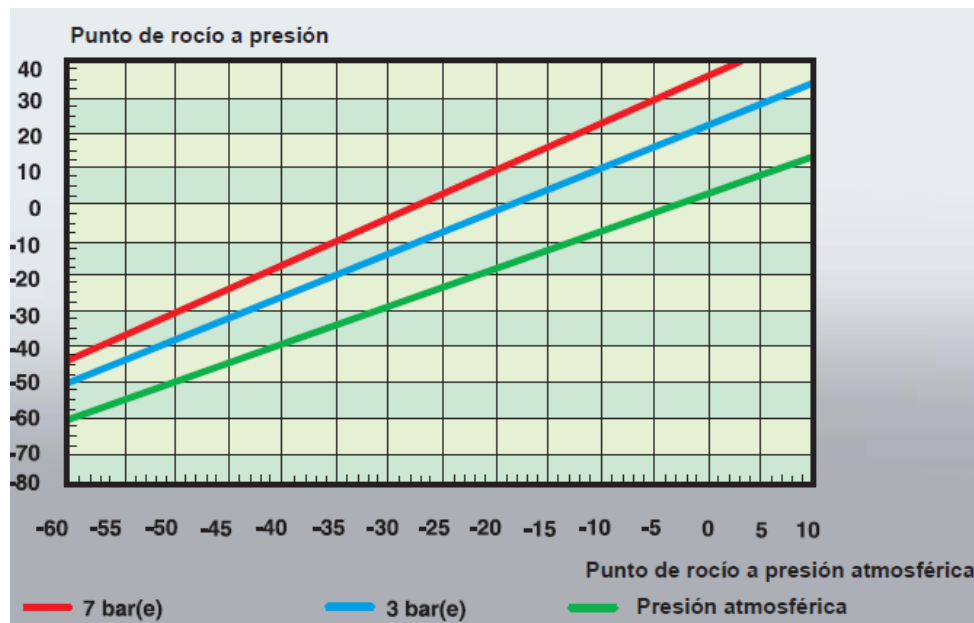


Figura 15. Relación entre punto de rocío y punto de rocío a presión.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

Los tipos de secador de aire son (Atlas Copo Airpower NV, 2011):

1. Refrigerador posterior: es un tipo de intercambiador ubicado después del compresor, el cual condensa cerca del 80%-90% del agua. Generalmente, la temperatura del aire después de pasar por el refrigerador posterior es de alrededor de 10°C. Este dispositivo en los compresores modernos ya viene integrado.
2. Secador frigorífico: este dispositivo es un adicional al sistema de generación de aire comprimido, en algunas aplicaciones es necesario. Consiste principalmente en enfriar el aire comprimido mediante la acción de un sistema de refrigeración cerrado. Se utiliza para puntos de rocío de +2°C y +10°C, y su límite inferior es el punto de congelación del agua. En la Figura 16, se muestra el comportamiento de los parámetros del aire durante la generación del aire comprimido. El secado del aire comprimido genera aproximadamente el 3% de los costos energéticos (Garro, 2017).

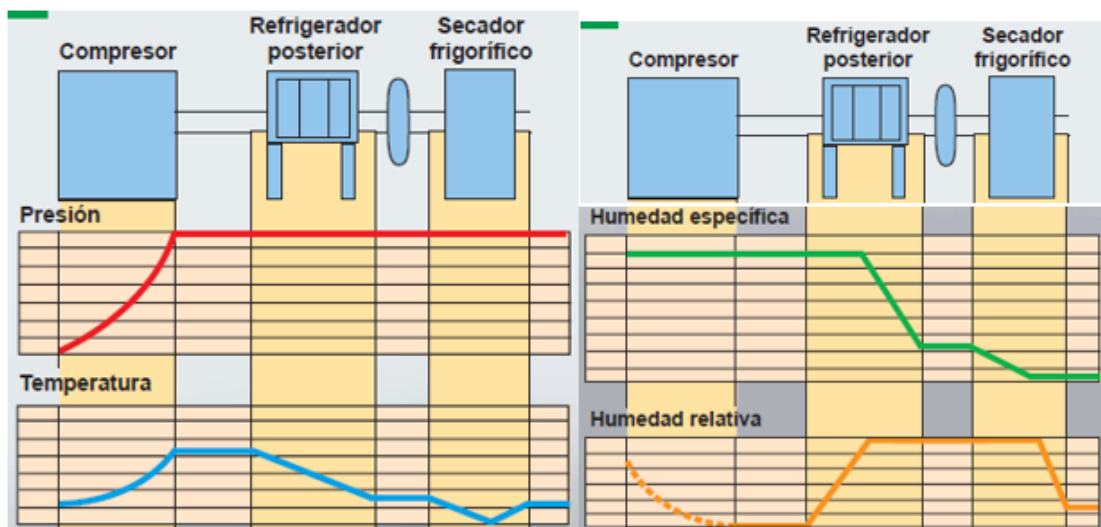


Figura 16. Cambios típicos de los parámetros con la compresión, la refrigeración y el secado con refrigerante.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

3. Secado por absorción: este método utiliza un químico que atrae la humedad. Aproximadamente un kilogramo de sal es capaz de retener cerca de 13kg de agua condensada, por lo tanto, es necesario recargar el sistema frecuentemente (Garro, 2017).
4. Secado por adsorción: en este caso, el aire se hace pasar por un material higroscópico llamado desecante, el cual, al igual que el método por

absorción, se debe regenerar frecuentemente (Atlas Copo Airpower NV, 2011).

5. Secado de membrana: está conformado por un haz de fibras donde existe un intercambio entre aire seco a presión ambiental y aire húmedo a presión, el fenómeno físico relacionado es por medio de la diferencia de presión, el sistema tiende a equilibrar la humedad, por lo tanto, la transfiere del aire húmedo al seco (Garro, 2017).

Para obtener aire comprimido de cierta calidad, no es suficiente una etapa de filtrado, es necesario disponer de dos o más etapas en serie. Existen distintos tipos de filtros según la tecnología y su principio de separación de partículas, entre ellos (Garro, 2017):

1. Filtros ciclónicos: estos filtros utilizan el principio de fuerza centrífuga para separar las partículas de mayor tamaño y líquidos, arroja las partículas hacia la pared del filtro.
2. Filtros de capa simple: se componen de material filtrante como tejido de metal y sintético.
3. Filtros de capas múltiples: estos constan de distintas capas de material filtrante, donde cada capa filtra un tamaño menor de partícula. Este tipo de filtro retiene líquidos y aceite, luego los deposita en el fondo para ser purgados.
4. Filtros de carbón activado: contiene un tipo de carbón amorfo y poroso que retiene partículas muy finas. Debe ser implementado después de otro tipo de filtro visto anteriormente.

3.9 Sistema general de aire comprimido (generación y demanda).

Un sistema de aire comprimido se compone de dos partes: la generación o suministro y la demanda o consumo, a su vez, se divide en subsistemas, los cuales cumplen funciones específicas, entre ellas cumplir con la calidad del aire; en la Figura 17 se muestran los elementos que componen cada una de estas partes de una típica red de aire comprimido (Garro, 2017).

Del lado de la generación se cuenta con:

1. Compresor
2. Postenfriador
3. Separador de humedad
4. Tanque receptor
5. Secador
6. Postfiltro.

Nota: los fabricantes de compresores venden las unidades de compresión generalmente en forma de paquete e incluyen los primeros cuatro elementos de la lista.

En la parte de demanda se tienen:

1. Tanque o tanques pulmón.
2. Tuberías de distribución.
3. Consumidores.

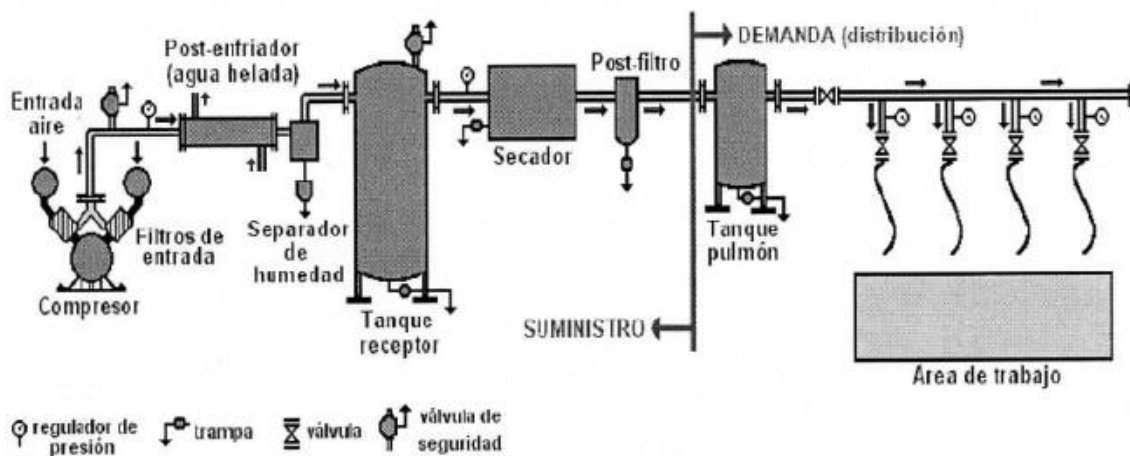


Figura 17. Diagrama general de un sistema de aire comprimido.

Fuente: Garro (2017).

En la sección de demanda se encuentran las tuberías, accesorios y equipos que consumen el aire comprimido. Las tuberías permiten transportar el aire desde su generación hasta el equipo. La distribución de tuberías se clasifica de la siguiente forma (Garro, 2017):

- Tubería principal: transporta el aire comprimido desde el compresor o tanque hasta el recinto. Transporta el caudal total demandado.

- Tubería de distribución o secundaria: comunica la tubería principal con las áreas, puestos de trabajo o equipos de gran consumo.
- Tubería de servicio o bajantes: esta tubería comúnmente es flexible y es el punto final de interconexión entre la tubería de distribución y el equipo o toma.
- Derivación: son las tuberías que conectan la tubería de distribución con un punto muerto (toma prevista para múltiples usos desde limpieza hasta equipo manual).

El la Figura 18 se muestra de forma gráfica el nombre que se les da a las tuberías según la conexión y función que cumplen. En la Tabla 1 se muestran velocidades recomendadas para los distintos tipos de tubería de una red de aire comprimido.

Tabla 1. Velocidades recomendadas para los distintos tipos de tubería.

Tipo de tubería	Velocidad recomendada (m/s)
Principal	8
Secundaria	10
Servicio	15
De interconexión	20-30

Fuente: Garro (2017).

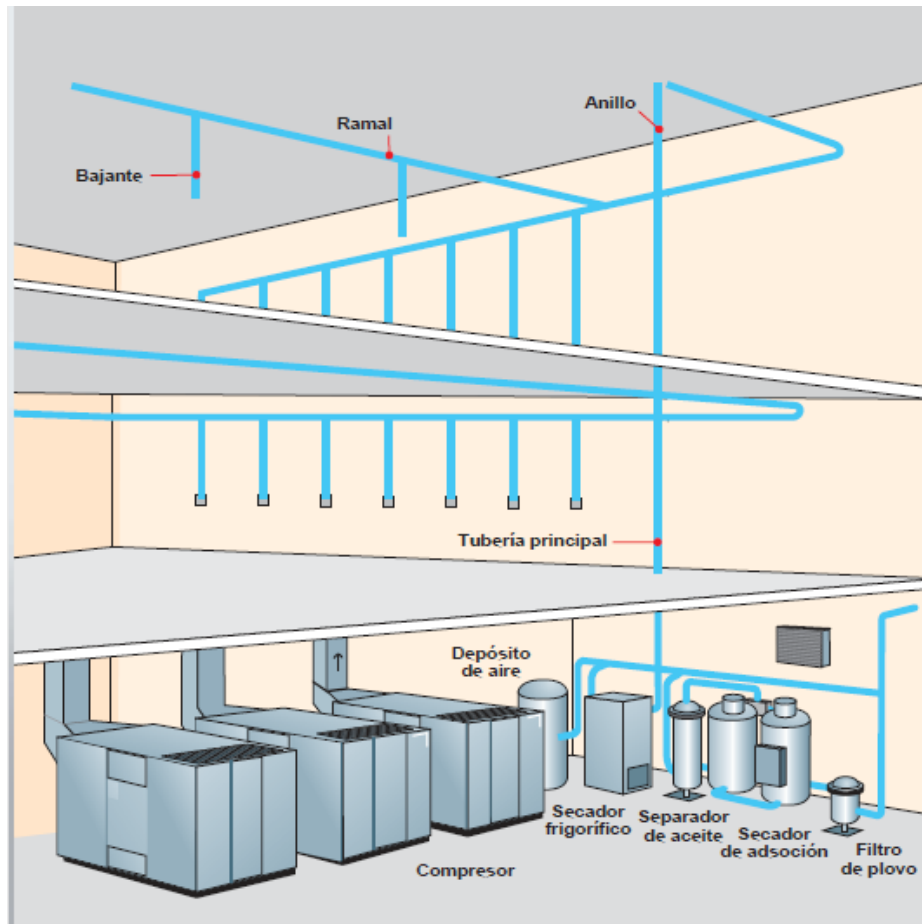


Figura 18. Nombramiento de tuberías según la conexión y función de estas.

Fuente: Atlas Copco Airpower NV (2011).

3.10 Diseño de sistemas de aire comprimido.

3.10.1 Estimación del caudal

Para el dimensionamiento de tuberías de aire comprimido es importante tener el caudal de aire que transporta dicha tubería, por lo tanto, se debe iniciar por las tuberías de servicio e interconexión y seguir escalando hasta la principal.

El caudal de aire comprimido resulta de la suma de los consumos de aire de cada uno de los equipos del proceso, más un factor de ampliaciones y de utilización. En el caso de pistones de aire comprimido, el caudal se estima con la Ecuación 2.

$$Q_{piston} = 2 * D * s * q * n$$

Ecuación 2. Cálculo del consumo de aire comprimido para pistones de doble efecto.

Fuente: Carnicer (1994).

Donde:

$Q_{\text{pistón}}$: consumo estimado de un pistón [l/min].

D: diámetro del pistón [mm].

S: carrera del pistón [cm].

N: número de accionamientos por minuto.

q: flujo de aire según diámetro y presión de la Figura 19.

Presión de trabajo en bar															
Diámetro cilindro, mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Consumo de aire en litros por cm de carrera del cilindro															
6	0,0005	0,0008	0,0011	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025	0,0027	0,0030	0,0033	0,0036	0,0038	0,0041	0,0044
12	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,018
16	0,004	0,006	0,008	0,010	0,011	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,029	0,032
25	0,010	0,014	0,019	0,024	0,029	0,033	0,038	0,043	0,048	0,052	0,057	0,062	0,067	0,071	0,076
35	0,019	0,028	0,038	0,047	0,056	0,066	0,075	0,084	0,093	0,103	0,112	0,121	0,131	0,140	0,149
40	0,025	0,037	0,049	0,061	0,073	0,085	0,097	0,110	0,122	0,135	0,146	0,157	0,171	0,183	0,195
50	0,039	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153	0,172	0,191	0,210	0,229	0,248	0,267	0,286	0,305
70	0,076	0,113	0,150	0,187	0,225	0,262	0,299	0,335	0,374	0,411	0,448	0,485	0,523	0,560	0,597
100	0,155	0,231	0,307	0,383	0,459	0,535	0,611	0,687	0,763	0,839	0,915	0,991	1,067	1,143	1,219
140	0,303	0,452	0,601	0,750	0,899	1,048	1,197	1,346	1,495	1,644	1,793	1,942	2,091	2,240	2,389
200	0,618	0,923	1,227	1,531	1,835	2,139	2,443	2,747	3,052	3,356	3,660	3,964	4,268	4,572	4,876
250	0,956	1,441	1,916	2,392	2,867	3,342	3,817	4,292	4,768	5,243	5,718	6,193	6,668	7,144	7,619

Figura 19. Consumo de aire en litros por cm de carrera de un pistón neumático.

Fuente: Carnicer (1994).

En el caso de equipos con datos de placa o manuales, se encuentran las especificaciones técnicas necesarias, así como el consumo de aire comprimido y la calidad de aire requerido.

De acuerdo con Kaeser, para estimar el consumo de aire comprimido total ($V_{\text{herramientas}}$), se debe realizar el listado de equipos con el consumo de aire requerido en scfm, el número de equipos iguales, el ciclo de carga y el factor de simultaneidad; dicho factor depende del número de equipos iguales, en la Figura 21 se muestran los valores según la cantidad de equipos. Como se muestra en la Figura 20, el consumo total es la suma del consumo calculado de cada equipo. Adicionalmente, se debe contemplar un factor para futuras ampliaciones (FA) y un factor debido a

las fugas (FF), según el tipo de material de las tuberías, para hierro galvanizado se contempla un 15% y para aluminio un 0% (Garro, 2017).

Energy Saving System Service



1. ¿Qué cantidad de aire necesita que los compresores suministren?

1.1 Consumo de aire de herramientas y máquinas usadas

Herramientas, máquinas	Consumo de aire por herramienta, máquina scfm	No. de herramientas, máquinas	Ciclo de Carga / Vacío %	Factor de simultaneidad %	Consumo de aire calculados cfm
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	x <input type="text"/>	= <input type="text"/>
Consumo de aire de todas las herramientas = $V_{herramientas}$					<input type="text"/> cfm

Figura 20. Consumo de aire de herramientas y máquinas usadas.

Fuente: Kaeser Compresores (s.f.).

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

Figura 21. Factor de simultaneidad según la cantidad de equipos repetidos.

Fuente: Garro (2017).

$$Q_{diseño} = V_{herramientas}(1 + FF + FA)$$

$$Q_{compresor} = Q_{diseño} * FM$$

Ecuación 3. Cálculo del flujo de aire comprimido para la selección del compresor.

Fuente: Garro (2017).

Donde:

$Q_{\text{compresor}}$: flujo que necesita entregar el compresor [acfm].

FM: factor multiplicador para convertir de scfm a acfm.

$Q_{\text{diseño}}$: flujo máximo demandado por los equipos [scfm].

3.10.2 Pérdida de presión y longitud equivalente

Se deben tomar en cuenta ciertos fenómenos físicos que ocurren en la mecánica de fluidos con respecto a la presión (Bonilla, 2014):

- La pérdida de presión es proporcional a la longitud de tubería y a la cantidad de accesorios conectados a esta.
- La pérdida de presión es proporcional a la velocidad del fluido (aire) en la tubería.

Estos fenómenos se deben tener en cuenta durante el diseño, ya que una alta caída de presión conlleva a grandes consumos energéticos.

En la Ecuación 4, se muestran las variables que afectan la caída de presión, al conocerlas y tomarlas en cuenta se puede minimizar la caída de presión según el diseñador, la instalación física y el diseño lo permita.

$$\Delta p = \frac{450 Q_d^{1,85} L}{d^5 P}$$

Ecuación 4. Cálculo de la pérdida de presión

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

Δp : caída de presión [bar]

Q_d : caudal de diseño [l/s]

L: longitud equivalente de tubería [m]

T: temperatura del aire [K]

P: presión absoluta [bar(a)]

d: diámetro interno de tubería [mm]

La longitud equivalente corresponde a la longitud de tubería física y a una estimación de caída de presión que genera un accesorio en función de la longitud de tubería. En la Figura 22 se muestran las estimaciones de longitud para cada tipo de accesorio que se podría colocar en una red de aire comprimido.












Longitud equivalente en metros											
Componente	Diametro interior de la tubería en mm (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Válvula de 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 antirretorno de clapeta 	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	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
Ángulo 90° 	1.5	2.4	3.0	4.5	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

Figura 22. Longitud equivalente en metros para accesorios de tuberías.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

3.10.3 Cálculo y selección de tuberías

Con la ayuda de las siguientes reglas, se pone un punto de partida para el dimensionamiento de las tuberías (Bonilla, 2014):

1. Mantener la pérdida de presión en un valor menor a 2% desde el compresor hasta el usuario. Se admite un 3% en redes muy extensas. Por lo tanto, lo recomendable es minimizar la distancia y la cantidad de accesorios.

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

Figura 23. Caída de presión admisible según el tipo de tubería.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

2. Se debe establecer un límite de velocidad del aire en la tubería, en la Tabla 1 se dio una recomendación de velocidades.
3. Establecer un límite aceptable de pérdidas por fugas, se recomienda un valor menor a 5% y en casos de redes extensas un 10%.
4. Considerar un factor de ampliaciones en la tubería, para prever la instalación de equipo nuevo o modificaciones en la demanda. Se recomienda un valor del 20%.

Una vez establecidos estos parámetros y tomando en cuenta el caudal de aire que pasará por dicha tubería, se procede a utilizar los nomogramas o a utilizar los *softwares* disponibles en la actualidad, algunos de estos están disponibles en línea, como el que brinda Kaeser en su sitio web. También se puede utilizar la Ecuación 5:

$$d = \sqrt[5]{\frac{(450 * q_c^{1,85} * L_{eq})}{(\Delta P * P)}}$$

Donde:

q_c : flujo de aire comprimido [l/s].

L_{eq} : longitud equivalente de tubería [m].

ΔP : caída de presión [bar].

P : presión [bar(a)].

Ecuación 5. Cálculo del diámetro adecuado según el flujo a través de una tubería.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

En el caso del uso de nomogramas, como el de la Figura 24, se tiene que determinar:

1. Longitud equivalente [m]
2. Caudal de aire (incluye factores de ampliación) [m³/h]
3. Presión del sistema [bar]
4. Pérdida de presión [bar (a)]

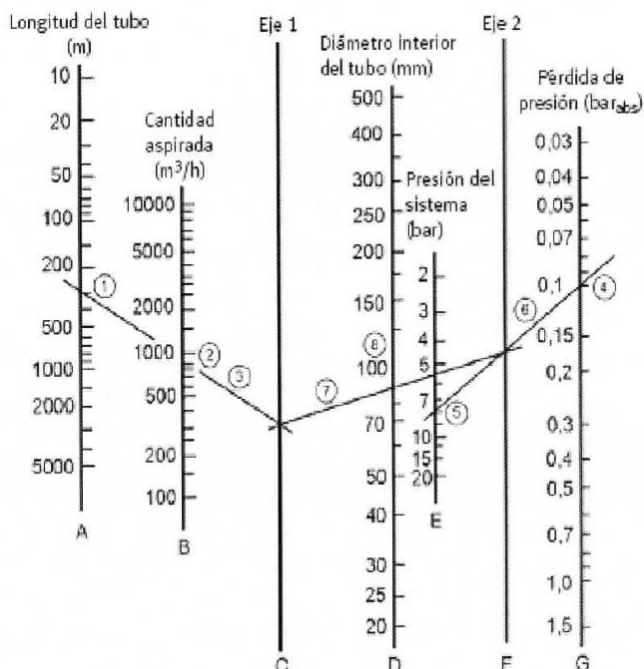


Figura 24. Nomograma para el dimensionamiento de la tubería de aire comprimido.

Fuente: Garro (2017).

En la Ecuación 6 se muestra el cálculo del porcentaje de ampliación disponible en la tubería. En caso de ser un valor negativo, lo que indica es que la tubería está saturada y que el caudal máximo se superó.

$$\% \text{ de ampliación} = \frac{Q_{\text{máx}} - Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{máx}}} 100$$

Ecuación 6. Porcentaje de ampliación.

Fuente: Fallas (2018).

3.10.4 Tanque de almacenamiento

El depósito de aire debe ubicarse entre el compresor y la red o en la zona de mayor consumo. Su principal función es responder a los cambios repentinos en la demanda y equilibrar las pulsaciones de aire que viene del compresor. Cumple con

la función de regular los periodos de regulación: carga vacía y carga parada. También permite separar el aceite del aire y la humedad condensada. Su tamaño depende de:

- Capacidad del compresor o compresores.
- Cantidad de aire requerida por el sistema.
- Red de tuberías.
- Regulación del compresor.
- Oscilación de la presión del sistema.

Un criterio de Sullair para la selección del tanque de almacenamiento es el de reservar 4 galones por cada cfm que entrega el compresor. Además, existen herramientas de cálculo como la de la Figura 25, la cual está disponible en el sitio web de Kaeser, donde el cálculo del volumen del tanque se basa en el caudal de los compresores, el consumo de aire comprimido, las presiones de carga y descarga, los ciclos permitidos de paro y arranque.

Dimensionamiento del Tanque de Almacenamiento de Aire

¡Por favor, use punto en lugar de coma para indicar los decimales!
Los campos de texto azul muestran resultados.

Unidades SI
 Unidades US

Calcular como tanque de almacenamiento
 Calcular de acuerdo a la frecuencia mínima de conexión permitida

Flujo nominal requerido	V	0	m ³ /min
Tiempo de almacenamiento	t	0	min
Presión inicial del tanque de almacenamiento	P _I	0	bar
Presión final del tanque de almacenamiento	P _F	0	bar
Sin contemplar el caudal adicional del compresor			
Volumen del tanque de almacenamiento	V _R	0	m ³

Figura 25. Herramienta *online* de Kaeser para estimar el volumen del tanque de almacenamiento.

Fuente: KAESER Compressors (s.f.).

3.11 Sistemas de gestión de la energía, ISO 50001:2011

La finalidad de la norma es dar a las organizaciones herramientas para generar sistemas con el fin de mejorar el desempeño energético. Esta norma es aplicable a cualquier tipo y tamaño de organizaciones, únicamente depende del

compromiso de esta en todos los niveles desde la gerencia hasta proveedores y contratistas (INTECO, 2011).

Esta norma se basa en el ciclo de mejora continua PHVA:

P, Planificar: realizar una revisión energética y generar la línea base, indicadores de desempeño (IDEn), objetivos, metas y planes. Todo esto enfocado en la política energética de la empresa (Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2017).

H; Hacer: implementar los planes de acción.

V; Verificar: dar seguimiento y medición para determinar el desempeño energético e informar los resultados.

A; Actuar: tomar las acciones necesarias para mejorar el desempeño energético de forma continua.

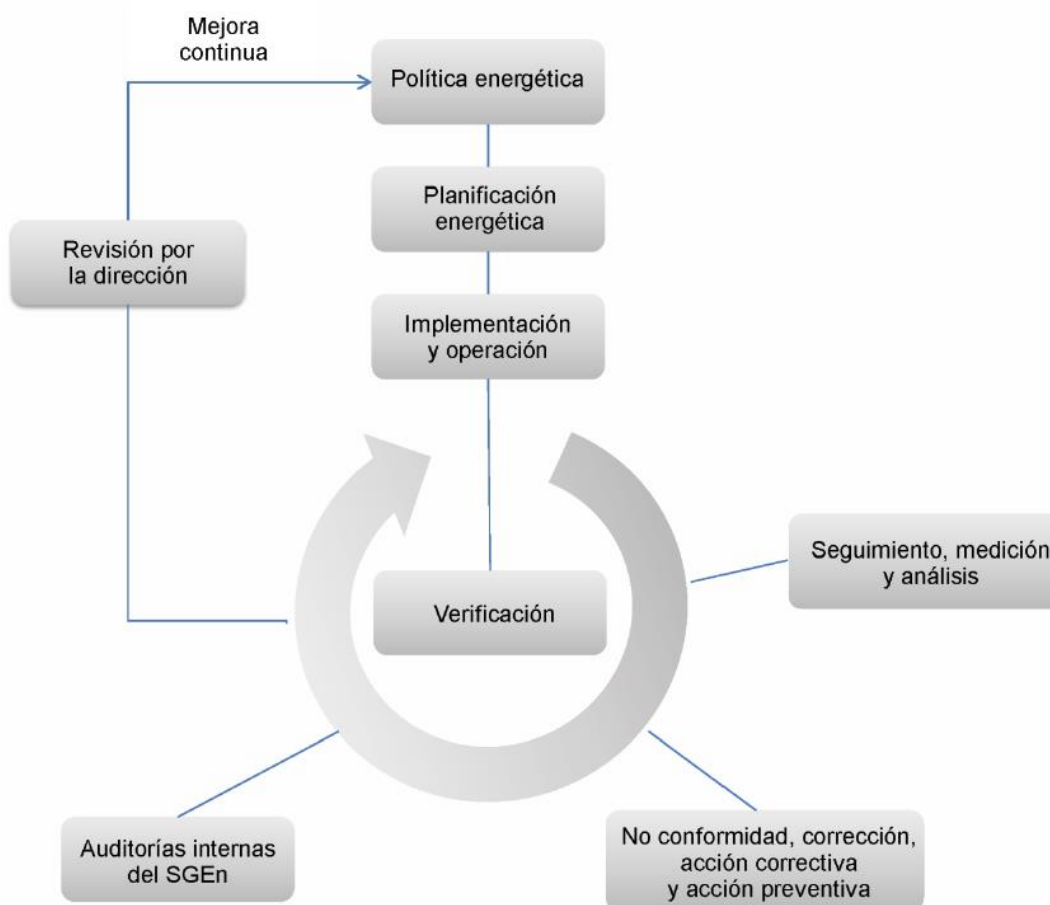


Figura 26. Modelo de sistema de gestión para la norma ISO 50001.

Fuente: INTECO (2011).

Con ayuda de esta norma, las organizaciones pueden mejorar su desempeño energético al desarrollar los siguientes puntos:

1. Revisión energética:
 - a. Identificar uso, consumo y mediciones.
 - b. Identificar el área de uso significativo de la energía.
 - c. Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético.
2. Línea base energética.
3. Generar indicadores de desempeño energético
4. Establecer objetivos, metas y planes de acción.

Durante la etapa de implementación y operación, es importante comunicar los objetivos para comprometer al personal y a toda la organización. Se debe mantener la información de forma sistemática. Otro aspecto importante es el diseño, contemplando las oportunidades de mejorar el sistema.

Finalmente, para garantizar el éxito energético y la mejora continua, se debe dar seguimiento, mediciones y análisis que permitan evidenciar desviaciones en los objetivos propuestos.

3.12 Ahorro de energía en sistemas de aire comprimido.

De acuerdo con Atlas Copo Airpower NV (2011), durante la vida útil de un sistema de aire comprimido, la estructura de costos está dominada por el consumo energético, como se muestra en la Figura 27, el 73% corresponde a este rubro. Es ahí donde cobra gran valor el identificar las oportunidades de ahorro energético.

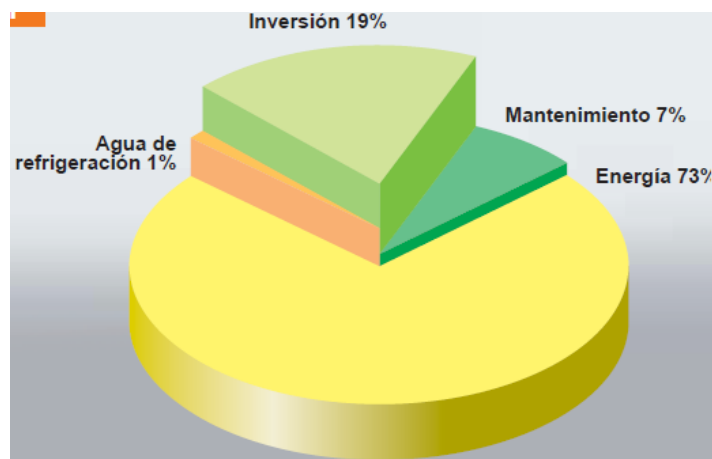


Figura 27. Estructura de costos de un sistema de aire comprimido durante su vida útil.

Fuente: INTECO (2011).

Las oportunidades para ahorrar energía en los sistemas de aire comprimido se dividen en dos, una parte se refiere a la parte de la generación y la otra a la demanda.

3.12.1 Ahorro energético en el área del suministro o generación

- **Reducir la presión de descarga del compresor (es):**

Los equipos de generación de aire comprimido deben satisfacer la presión de trabajo de los equipos más la caída de presión en la red, por lo tanto, el compresor siempre suministra una presión mayor. Este aumento de la presión está directamente relacionado con el consumo energético, mantenimiento y temperatura, por lo que al trabajar a una presión mayor los costos operativos y de mantenimiento son mayores (Alfaro, 2007).

Se estima que, por cada bar que se aumente la presión, el consumo energético aumenta de 6% a 10% (Garro, 2017). En algunos casos es posible reducir la presión de descarga del compresor hasta un valor que no ponga en riesgo el proceso productivo ni la eficiencia de los equipos de proceso. Esto conlleva a grandes ahorros en energía eléctrica.

- **Aumentar la temperatura del aire de admisión del compresor:**

Cuanto mayor sea la temperatura del aire de admisión, el consumo energético del compresor aumenta, debido a que la densidad del aire disminuye con la temperatura, por ende, al ingresar aire más frío al compresor, el volumen de aire

es mayor y su flujo dentro de la red es mayor entregando más aire, realizando un menor trabajo. Al ingresar aire caliente, el compresor debe realizar un mayor trabajo para comprimir este aire, incrementando el consumo energético. Se recomienda que el aire de admisión del compresor provenga del exterior del cuarto de compresores, ya que este se encuentra a una menor temperatura. Otro efecto es la disminución de la humedad en el aire, ya que, como se indagó anteriormente, la capacidad del aire para retener vapor de agua disminuye con la reducción de la temperatura (Alfaro Pincay, 2007).

- **Sobredimensionamiento del compresor:**

En el diseño de sistemas de aire comprimido, se debe tener en cuenta la capacidad de compresor. Un compresor sobredimensionado resulta ser muy ineficiente, generalmente se recomienda utilizar un compresor por encima del 80% de su capacidad. Una mala práctica es seleccionar un compresor de una mayor potencia con miras a una futura ampliación. Por lo tanto, una buena práctica es seleccionar un compresor que se ajuste a la necesidad actual y cuando se requiera mayor consumo, adquirir otro que supla ambas demandas para modular ambos compresores según la demanda (Alfaro, 2007).

- **Tratamiento del aire:**

Otro factor que incrementa el consumo energético es el tratamiento del aire. No es eficiente tratar el aire a una calidad superior a la necesaria en el proceso o equipos, por lo tanto, se debe tratar el aire comprimido justo a la necesidad del usuario. Si se tiene un equipo que requiere una alta calidad de aire, es recomendable tratar únicamente ese caudal de forma individual y no tratar el flujo de los otros equipos que no lo requieren (Alfaro, 2007).

- **Controlador de flujo:**

Consiste en un dispositivo que separa el suministro de la demanda. Crea un almacenamiento real con el tanque receptor acumulando el aire comprimido sin enviarlo aguas abajo. La presión sube aguas arriba del controlador de flujo en el receptor, mientras el controlador libera el flujo necesario de forma constante a una menor presión, de tal forma que evita la pérdida de presión debido al aumento instantáneo de la demanda (Kaeser Compressors, 2010).

3.12.2 Ahorro energético en el área de la demanda:

En la parte de la demanda, se tienen distintos tipos de demanda de aire comprimido, entre ellas: producción, fugas, malas prácticas y demanda artificial. Idealmente se busca tener solo una demanda de producción, sin embargo, es inevitable que se tengan los otros tipos de demandas, lo cual afecta directamente el consumo energético del sistema, a tal punto que pueden llegar a sumar el 50% del flujo de aire comprimido, como se muestra en la Figura 28.

Componentes de Demanda

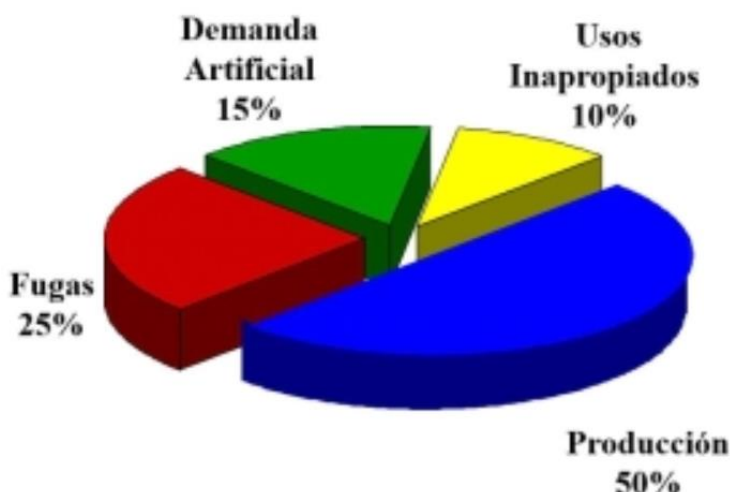


Figura 28. Estructura de la demanda de aire comprimido.

Fuente: (COFISA,2019)

- **Fugas de aire comprimido:**

Como se observa en la Figura 28, se estima que en la industria en general 25% del aire comprimido que se produce se pierde en fugas. Según el tamaño de la fuga, puede ser perceptible al oído humano, sin embargo, existen otras que no son detectadas con los sentidos y se debe recurrir al uso de técnicas de detección de fugas como el ultrasonido. Las fugas también generan pérdidas de presión y afectación al usuario final que son los equipos de proceso (Alfaro, 2007). Existen distintos métodos para estimar este porcentaje:

- Ultrasonido: se realiza mediante un instrumento que mide los decibeles emitidos por la fuga. En el *software* se ingresa el valor en decibeles y mediante los datos que el fabricante ha desarrollado

en su laboratorio, compara los datos y da como resultado el flujo correspondiente a dicha fuga. Esto se multiplica por el costo de la energía y la cantidad de horas de funcionamiento, y se obtiene el costo anual debido a dicha fuga; el total de pérdidas por fugas es la suma aritmética de cada fuga individual (Tecnologías Predictivas, 2019).

- b. Método práctico: se realiza con el compresor funcionando y la red de aire comprimido fuera de uso, es decir, asegurándose de que todos los usuarios de aire comprimido estén sin uso. Se procede a tomar el tiempo de carga y descarga del equipo. Y, finalmente, se utiliza la Ecuación 7.

$$L_v = \frac{t_1}{t_1 + t_2} * 100 \text{ [%]}$$

Ecuación 7. Estimar porcentaje de fugas, método práctico.

Fuente: Atlas Copco (2009).

Donde:

L_v : pérdida de aire comprimido en porcentaje.

t_1 : tiempo necesario para recuperar la presión de la red (tiempo de carga).

t_2 : tiempo de inactividad del compresor (tiempo en descarga).

En la Figura 29, se muestra una estimación del flujo de aire a través de un agujero redondo a 7 bares de presión.

4.7

Díametro de orificio	Caudal de salida a una presión de trabajo de 7 bar	Potencia requerida para el compresor
Tamaño mm	l/s	kW
1	1,2	0,4
3	11,1	4,0
5	31	10,8
10	124	43

La tabla muestra la relación entre fugas y consumo de energía para algunos orificios pequeños a una presión del sistema de 7 bar(e).

Figura 29. Flujo de aire comprimido a través de un agujero.

Fuente: Atlas Copo Airpower NV (2011).

- **Malas prácticas:**

El tema de malas prácticas en el uso del aire comprimido viene asociado al factor humano. Algunas malas prácticas son el uso de aire comprimido para limpieza de equipo, personas o puestos de trabajo; en algunos casos, se utiliza como enfriamiento, todo esto genera un consumo innecesario de aire comprimido. Otra mala práctica se da en el purgado manual del tanque pulmón, ya que en ocasiones los técnicos dejan la purga un poco abierta para evitar estar yendo al sitio a drenar los condensados, esto se remedia mediante el uso de purgas automáticas.

- **Demanda artificial:**

Este concepto se relaciona con la sobrepresión a la que trabaja el compresor con respecto a la presión de operación de los equipos. Es importante determinar la presión requerida por los equipos y la caída de esta para presurizar la red a la presión mínima necesaria para el buen funcionamiento de los equipos (Alfaro, 2007).

- **Caída de presión:**

Al comprar o reemplazar equipos, se debe tomar en cuenta la caída de presión de estos. Se debe asegurar que los filtros y el secador sean seleccionados y mantenidos adecuadamente. Además, se recomienda que la caída de presión a

través de todo el sistema de aire comprimido, incluyendo tubería y accesorios, no exceda un bar (aproximadamente 15 psi) (Kaeser Compressors, 2010).

- **Tuberías mal diseñadas:**

Este tipo de pérdidas ocurre con mayor frecuencia cuando la red fue diseñada para una capacidad y con el tiempo esta crece sin aumentar la capacidad de la tubería. Cuando fluye aire comprimido en una tubería mal diseñada, se generan mayores pérdidas asociadas a la pérdida de presión por fricción al aumentar la velocidad del fluido. Para evitar esto, se debe establecer el flujo máximo que puede trasegar cada tubería tomando en cuenta un factor por fugas, el cual depende del material, pero ronda de un 5% a un 15% (Garro, 2017) y un porcentaje por ampliaciones futuras (Alfaro, 2007).

3.13 Costo del aire comprimido

Como se observó en la Figura 27, el 73% de los costos son debido al consumo energético de los compresores. Existen diversos métodos para estimar los costos del aire comprimido de forma matemática o mediante los datos de algún sistema de monitoreo.

Mediante el método matemático, se tiene la siguiente ecuación (Alfaro, 2007):

$$Potencia\ del\ compresor_{3\phi} = \frac{\sqrt{3} * V * I * \eta_{motor} * fp}{746} [hp]$$

Ecuación 8. Cálculo de la potencia del compresor.

Fuente: Kaeser Compressors (2010).

Donde:

V: tensión de línea.

I: corriente de línea.

η_{motor} : eficiencia del motor.

fp: factor de potencia.

$$Costo\ anual = \frac{Bhp * 0,746}{\eta_{motor}} * \%TiempoCargado * Horas * Costo\ kWh$$

Ecuación 9. Estimación del costo energético del aire comprimido.

Fuente: Alfaro (2007).

Donde:

Bhp: es aproximadamente el 110% de la potencia del compresor.

%Tiempo cargado: es el porcentaje de tiempo a máxima carga.

Horas: total de horas de trabajo del compresor por año.

3.14 Costo de las fugas.

El flujo debido a fugas en una red de aire comprimido se determina cuando la red se encuentra estable, sin los equipos en uso, pero sí conectados; se toma el tiempo de carga y descarga de la red y el dato de flujo volumétrico entregado por el compresor (Kaeser Compressors, s.f.).

$$V_l = \frac{V_c \sum t_x}{T}$$

Ecuación 10. Cálculo del flujo de aire comprimido debido a fugas.

Fuente: Kaeser Compressors (s.f.).

Donde:

V_l : flujo debido a fugas (cfm).

$\sum t_x$: sumatoria de tiempos de carga (min).

T: tiempo total, suma de tiempos de carga y descarga.

Estimar el costo energético asociado a fugas es importante porque puede llegar a representar 25% del consumo energético del sistema. Por lo tanto, se debe realizar una comparación entre los costos anuales debido a fugas, con los costos de mantenimiento por reparación de fugas. Como herramienta para la estimación de fugas se puede recurrir a la:

$$\text{Costo por fuga} = \text{cfm} * \frac{\text{kw}}{\text{cfm}} * \frac{\$}{\text{kwh}} * \text{Hora} * \text{factor de corrección}$$

Ecuación 11. Cálculo de costo de una fuga.

Fuente: Pincay (2007).

Donde:

Cfm: caudal que se pierde en la fuga según la tabla de la Figura 30.

kW/cfm: energía que necesita el compresor para producir un cfm.

Factor de corrección: orificios redondos 0,97 y alargados 0,61.

Horas: total de horas de trabajo del compresor por año.

\$/kWh: costo energético por kWh que se paga a la compañía eléctrica.

<i>Discharge of Compressed Air Through an Orifice in SCFM</i>										
GAUGE PRESSURE AT ORIFICE	1/32	1/16	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
30	.633	2.53	10.10	40.50	91	162	253	365	496	648
35	.703	2.81	11.30	45.00	101	180	281	405	551	720
40	.774	3.10	12.40	59.60	112	198	310	446	607	793
45	.845	3.38	13.50	54.10	122	216	338	487	662	865
50	.916	3.66	14.70	58.60	132	235	366	528	718	938
60	1.06	4.23	16.90	67.60	152	271	423	609	828	1082
70	1.20	4.79	19.20	76.70	173	307	479	690	939	1227
80	1.34	5.36	21.40	86	193	343	536	771	1050	1371
90	1.48	5.92	23.70	95	213	379	592	853	1161	1516
100	1.62	6.49	26.00	104	234	415	649	934	1272	1661
110	1.76	7.05	28.20	113	254	452	705	1016	1383	1806
120	1.91	7.62	30.50	122	274	488	762	1097	1494	1951
125	1.98	7.90	31.60	126	284	506	790	1138	1549	2023
150	2.37	9.45	37.50	150	338	600	910	1315	1789	2338
200	3.10	12.35	49	196	441	784	1225	1764	2401	3136

Based on 100% coefficient of flow. For well-rounded orifices, multiply values by .97
For sharp edge orifices, multiply values by .65
This table represents approximate values

Figura 30. Descarga de aire comprimido a través de un orificio.

Fuente: Atlas Copco Compressors, LLC (s.f.).

En caso de obtener el porcentaje de fugas mediante el método práctico mencionado anteriormente, se puede estimar el costo de las fugas mediante la siguiente ecuación:

$$Cf = Cec * Lv$$

Ecuación 12. Cálculo de costo de una fuga con el porcentaje de fugas del método práctico.

Fuente: Atlas Copco (2009).

Donde:

Cf: costo de la fuga.

Cec: costo energético del aire comprimido (en carga).

Lv: porcentaje de fugas.

3.15 Huella de carbono y gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos emitidos al ambiente producto de las actividades industriales de producción, consumo de bienes y servicios. Los GEI se componen de distintos tipos de compuestos, sin embargo, el dióxido de carbono es el que se emite en mucho mayor cantidad, por lo tanto, la unidad de los gases de efecto invernadero y la huella de carbono en general se

mide en toneladas de CO₂ equivalentes. Estos gases forman una capa en la atmósfera que no permite que la radiación solar salga al espacio, lo cual provoca un incremento en la temperatura del planeta.

La huella de carbono mide la cantidad equivalente de CO₂ que una industria emite al ambiente. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) desarrolla anualmente un informe sobre los factores de emisión de gases de efecto invernadero para el sector energía. El último informe disponible es el del 2018. Para interés del proyecto, se toma el factor de emisiones para el uso de la electricidad, el cual se muestra en la Figura 31; para el año 2017 (último dato disponible) corresponde a 0,0754 kg CO₂e/kWh. El costo por toneladas de CO₂ emitidas de acuerdo con datos del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO, 2019) es de \$7,5 / Ton CO₂e.

<i>Año</i>	<i>Factor de emisión kg CO₂ e/kWh</i>
2017	0,0754
2016	0,0557
2015	0,0381
2014	0,1170
2013	0,1300
2012	0,0771

Figura 31. Factor de emisión de gases efecto invernadero para el sector energía uso de electricidad.

Fuente: Instituto Metereológico Nacional (2018).

3.16 Indicadores financieros

Es importante definir los indicadores financieros que rodean un proyecto empresarial, estos definirán su éxito y el beneficio monetario que se espera recibir en un lapso definido. Al realizar un estudio financiero, se deben contemplar distintos factores o montos que sumados permitirán justificar el proyecto, de acuerdo con Romero (2018), dichos factores son:

- Inversión inicial: este rubro corresponde al costo de los activos tangibles e intangibles que se adquieren o se requieren antes, durante y después de la realización del proyecto.

- Costo de operación: este incluye los costos directos e indirectos, tales como energía, materia prima, mano de obra, entre otros.
- Costo de capital: consiste en la fuentes de financiamiento del proyecto.
- Rentabilidad: para determinar la rentabilidad es necesario el uso de indicadores como el VAN y la TIR, con el fin de evaluar la inversión.

Valor Actual Neto (VAN o NPV)

Este permite actualizar los ingresos futuros a la fecha actual. La interpretación de este indicador es (García, 2014):

- VAN > 0: la inversión generará ganancias por encima de la rentabilidad exigida (r). Es decir, el proyecto puede aceptarse.
- VAN < 0: la inversión generará pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida (r). Es decir, el proyecto debe rechazarse.
- VAN = 0: la inversión no genera ganancias ni pérdidas, por lo tanto, la decisión debe basarse en criterios no financieros, sino técnicos, ambientales, de seguridad, entre otros.

$$VAN = -I_o + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

<p>F_j = Flujo Neto en el Período j I_o = Inversión en el Período 0 i = Tasa de Descuento del Inv. n = Horizonte de Evaluación</p>

Figura 32. Fórmula de cálculo del indicador financiero VAN.

Fuente: García (2014).

Taza Interna de Retorno (TIR o IRR)

De forma simple, el TIR es la tasa de interés o tasa de descuento con el cual el VAN se hace igual a cero. Un TIR alto indica una mayor rentabilidad. El criterio para aceptar un proyecto es el siguiente (García, 2014):

- $TIR \geq r$: se acepta el proyecto, ya que da una rentabilidad mayor a la mínima requerida.
- $TIR \leq r$: se rechaza, ya que el proyecto da una rentabilidad menor a la esperada.

Periodo de recuperación de la inversión (PR o PB)

Este indicador muestra en cuánto tiempo en años se recupera la inversión del proyecto a partir de los ahorros o ingresos generados (Romero, 2018).



Capítulo 4. Sistema de aire comprimido

Realizar la evaluación del sistema de aire comprimido de la planta PIPASA SR implica la recopilación y análisis del sistema, cómo se encuentra diseñado, su funcionamiento, la fuente de energía principal, usos de la energía, datos de rendimiento y la identificación de las posibles oportunidades para mejorar el desempeño energético. Para ello se utilizan las herramientas y metodología de la norma UNE EN - ISO 11011:2015 (2015).

Es importante describir las condiciones ambientales de la zona donde se encuentra ubicada la planta, con ayuda de las estaciones automáticas del Instituto Meteorológico Nacional, se obtiene la información de la estación ubicada en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

Tabla 2. Datos meteorológicos de la zona de San Rafael de Alajuela.

Cantidad física	Valor
Altura	897 msnm
Presión atmosférica	912.8 hPa / 13,239psi / 0,913bar
Temperatura	28 °C
Humedad relativa	44%

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2018)

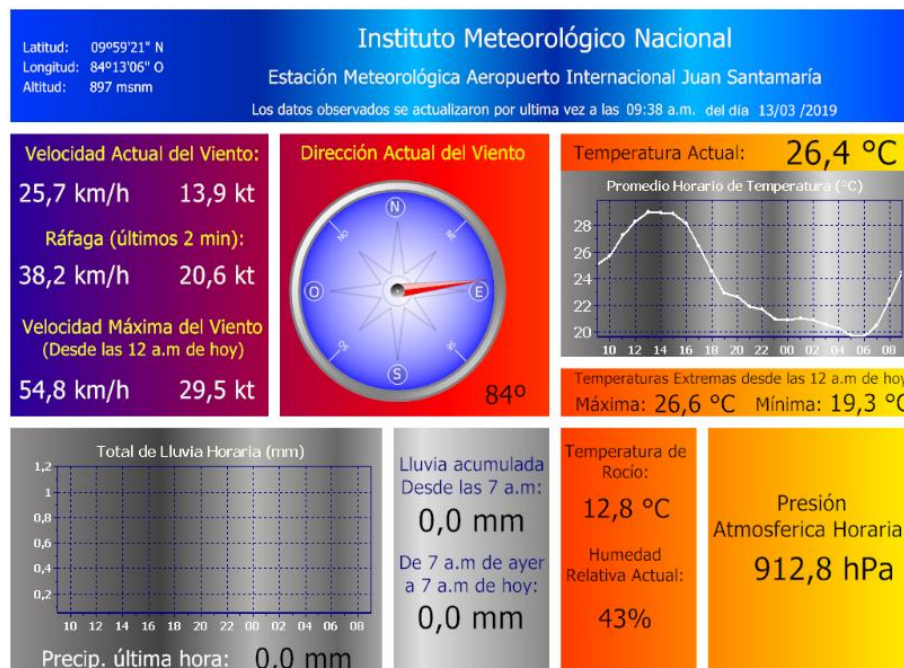


Figura 33. Condiciones ambientales de la zona de Alajuela, Aeropuerto Juan Santamaría.

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2018).

4.1 Antecedentes del sistema

Como se mencionó en la Descripción de la empresa, en el 2011 Cargill compró PIPASA SR, la información disponible de la red de aire comprimido data a partir de esa fecha, por lo tanto, se desconoce con exactitud su antigüedad, sin embargo, se estima en más de 20 años. Con la llegada de la nueva administración se han realizado importantes cambios e inversiones en mejorar la red.

El último levantamiento de la red de aire comprimido que se tiene registrado es del año 2015, realizado por la empresa Edder Zaldívar Arquitectos. Sin embargo, estos planos se encuentran desactualizados, ya que se realizó un recorrido por la planta y se detectaron cambios en la red, han ingresado nuevos equipos y han salido de operación otros, esto conlleva a la instalación de nuevas tuberías y la salida de operación de otras.

Como parte de las actividades previas a la evaluación, se realizó la recopilación de datos del sistema, entre lo encontrado está que en el año 2017 se realizó un estudio por parte de la empresa Kaeser para evaluar la viabilidad en la inversión de nuevo equipo de generación de aire comprimido y sustituir los compresores viejos. Como resultado de dicho estudio se realizó la inversión y se adquirieron dos compresores ASD 40, además, se reacomodó el cuarto de compresores y se realizó un nuevo diseño de tuberías en dicha locación. Los resultados resumidos del estudio se muestran en la Figura 34, donde en promedio se tiene un caudal de 357.93 CFM y un máximo de 576.72 CFM, durante el periodo de medición.

Como resultado de dicho estudio se realizó la inversión planeada y es el equipo que actualmente se tiene instalado en la planta PIPASA SR, el cual consta de un compresor de CSD 75, dos compresores ASD 40 y un secador de aire TG 301E, los cuales se especifican más adelante.

Analizando la curva de demanda del estudio realizado por Kaeser en el 2017 y tomando como demanda de fugas el promedio del consumo del domingo, ya que la planta detiene su producción desde el sábado a las 5 p.m. hasta el domingo a las 7 p.m., para trabajos de mantenimiento de los equipos de proceso, dado que en ese periodo no existen usuarios de aire comprimido, este consumo es debido a las fugas

presentes en la red de tuberías. Este valor de consumo por fugas para el 2017 corresponde a un promedio de 110 CFM y una demanda de 358 CFM promedio debido a producción, se obtiene que un 30% del aire comprimido es debido a fugas. Estimando el costo con los datos del estudio, se obtiene que ese año y en esas condiciones de operación se perdieron aproximadamente \$13 000 debido a las fugas; en la Figura 35 se muestran los datos suministrados por Kaeser para el sistema de generación actualmente instalado contemplando 8400 horas al año de operación.

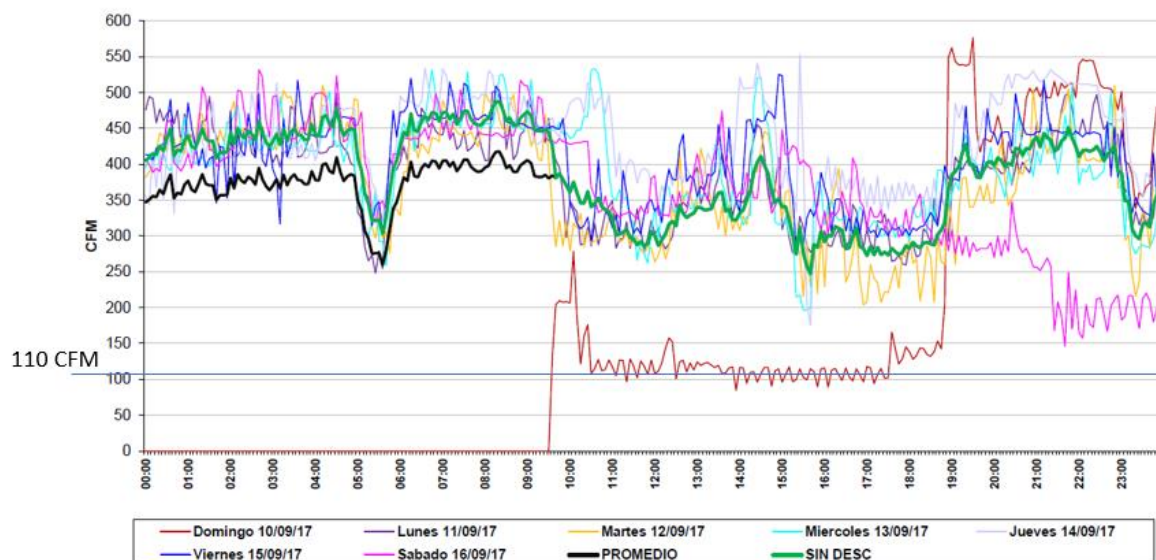


Figura 34. Curva de demanda de aire comprimido de la planta para el año 2017.

Fuente: Kaeser Compresores de Costa Rica (2017).

Flujo debido a fugas (CFM)		110,00	
kW/cfm		0,2437	
kWh /dia		643,368	
Costo Energético compresores			
	Kwh	Costo	total
Punta	134,04	₡ 61,88	₡ 8 294
Valle	241,26	₡ 30,94	₡ 7 465
Nocturna	268,07	₡ 22,28	₡ 5 973
	643,37		₡ 21 731
Costo Energético secador de aire (3%)			
	Kwh	Costo	total
Punta	4,02	₡ 61,88	₡ 249
Valle	7,24	₡ 30,94	₡ 224
Nocturna	8,04	₡ 22,28	₡ 179
Tipó de cambio	19,30	Total	₡ 652
609	Total		
Costo total fugas (semanal)	₡ 156 683	Costo Energético anual de las fugas del sistema	₡ 7 834 156
Costo total fugas (semanal)	\$ 257	Costo Energético anual de las fugas del sistema	\$ 12 864

Figura 35. Costo debido a las fugas presentes en la red de aire comprimido para el año 2017.

Fuente: Kaeser Compresores de Costa Rica (2017).

4.2 Estado actual del sistema

A continuación, se procederá a describir el sistema actual de aire comprimido de la planta PIPASA SR, tomando en cuenta desde la generación hasta los usuarios finales, también se toman en cuenta los costos asociados a dicho sistema en cuanto a sus pérdidas por los tipos de demanda, así como los costos asociados a afectación en la producción y daños en los equipos. Se utilizarán como una guía las herramientas de la norma UNE EN - ISO 11011:2015, Aire comprimido, eficiencia energética, Evaluación (UNE Normalización Española, 2015).

4.2.1 Cuarto de compresores

El cuarto de compresores se encuentra ubicado al costado sur de la planta, cerca del área de *rendering*. En la Figura 36 se puede apreciar la zona coloreada de amarillo, la cual corresponde al cuarto de compresores de aire comprimido y su ubicación con respecto al resto de la planta de producción.

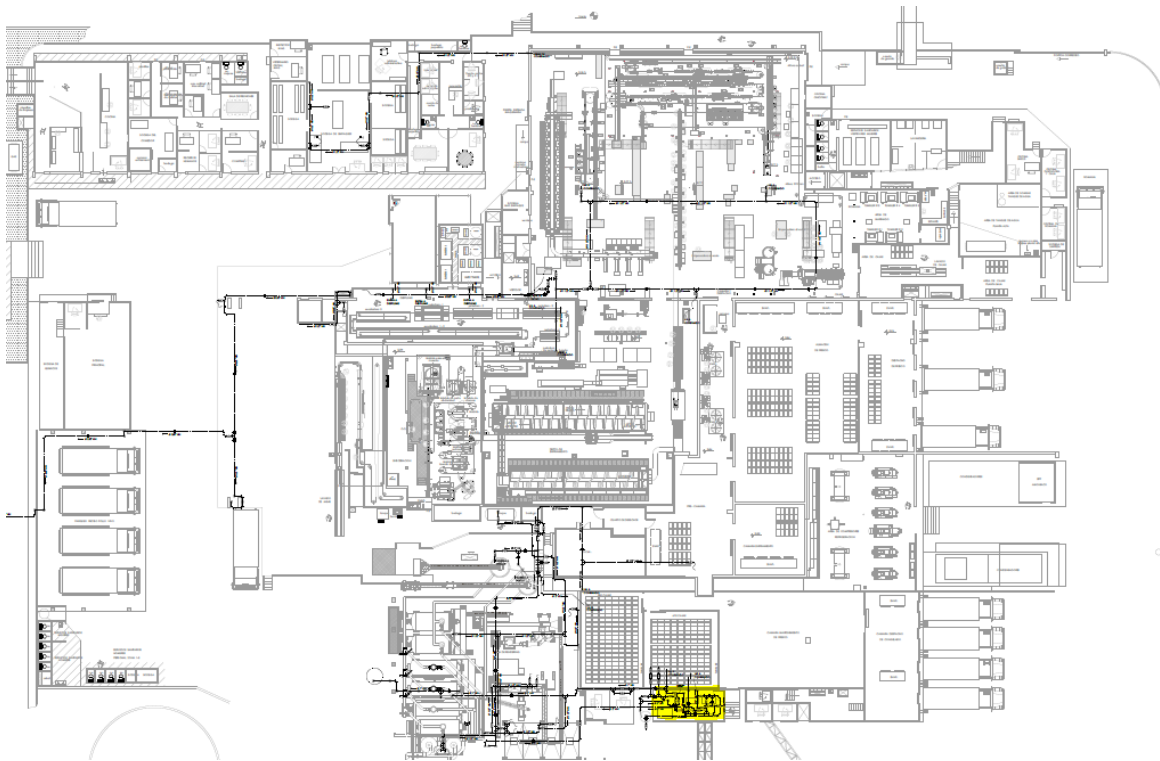


Figura 36. Ubicación del cuarto de compresores con respecto al resto de la planta PIPASA SR.

Fuente: (Edder Zaldívar Arquitectos, 2015)

En el cuarto de compresores se encuentran instalados tres compresores, un secador de aire marca Kaeser y un tanque receptor. El compresor número uno corresponde a un CSD 75 fabricado en el 2007, el cual tiene un capacidad de generación de $9,7704 \text{ m}^3/\text{min}$ (345 CFM) a 125 psi(g). En la Figura 37 se muestra la placa del equipo.

KAESER COMPRESORES			KAESER COMPRESORES de Guatemala y Cia Ltda 19 Avenida 16-56 Zona 10, Bodega No. 3 Ciudad de Guatemala, Guatemala Teléfono: (502) 2412-6000 Fax: (502) 2412-6060 E-mail: info.guatemala@kaeser.com		
Tipo	CSD 75		Artículo - N°	100265.2	
Año	2007		Serie - N°	1407	
psig	125	pcm	345	Voltaje	460
Hz/RPM	3568		Unidad APC	97	
Fases	3	HP	75	Motor APC	85
Esquema	SCSD - U2000.01		MADE IN GERMANY CO		
Para el servicio, referirse al número del equipo				3171779	
Opción			K1	C3	

Figura 37. Datos de placa del compresor CSD 75.

Fuente: elaboración propia.

Los otros dos compresores corresponden al modelo ASD 40, los cuales tienen una capacidad de generación de 5,4053 m³/min (191 CFM) a 125 psi(g) y fueron fabricados en el 2016. En la Figura 38 se muestra la placa del equipo.

KAESER COMPRESSORS			KAESER KOMPRESSOREN SE Carl-Kaeser Str. 26 GERMANY - 96450 Coburg www.kaeser.com	
Tipo	ASD 40	Artículo-N°	101628.0	
Año	2016	Serie-N°	1350	
psig	125.0	pcm	191	
Voltaje	208Y/120 V 230Y/133 V 460Y/266 V			
Fases	3	Unidad APC	112 105 52	
Hz	60	Motor de acción, APC	100 94 47	
RPM	3570	HP	40.0	
Voltaje de aliment.		Corriente de corto circuito:		
208 V		50 kA rms sym.,	480 V max.	
230 V		50 kA rms sym.,	480 V max.	
460 V		50 kA rms sym.,	480 V max.	
		Fusible de alimentación (Campo dado):		
208 V	Clase AJT	600 V	150 A	
230 V	Clase AJT	600 V	150 A	
460 V	Clase AJT	600 V	70 A	
Tipo de protección del gabinete: Tipo 1				
Esquema		SASD-U3052.00		
Para el servicio, referirse al número del equipo				5864858
Opción				K1 C3
MADE IN GERMANY		Identificación fábrica CO		

Figura 38. Datos de placa de uno de los compresores ASD 40.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 39 se muestra la vista isométrica del cuarto de compresores, en esta se pueden observar las tuberías que alimentan de aire comprimido la planta. Se cuenta con una tubería hacia el área de despacho, render, el tanque pulmón 2, un equipo de soplado y aseo en render, y finalmente la tubería principal que se dirige hacia proceso primario y secundario. También, se puede observar el acomodo del cuarto y cómo están ubicados los compresores, el secador, filtros y demás accesorios.

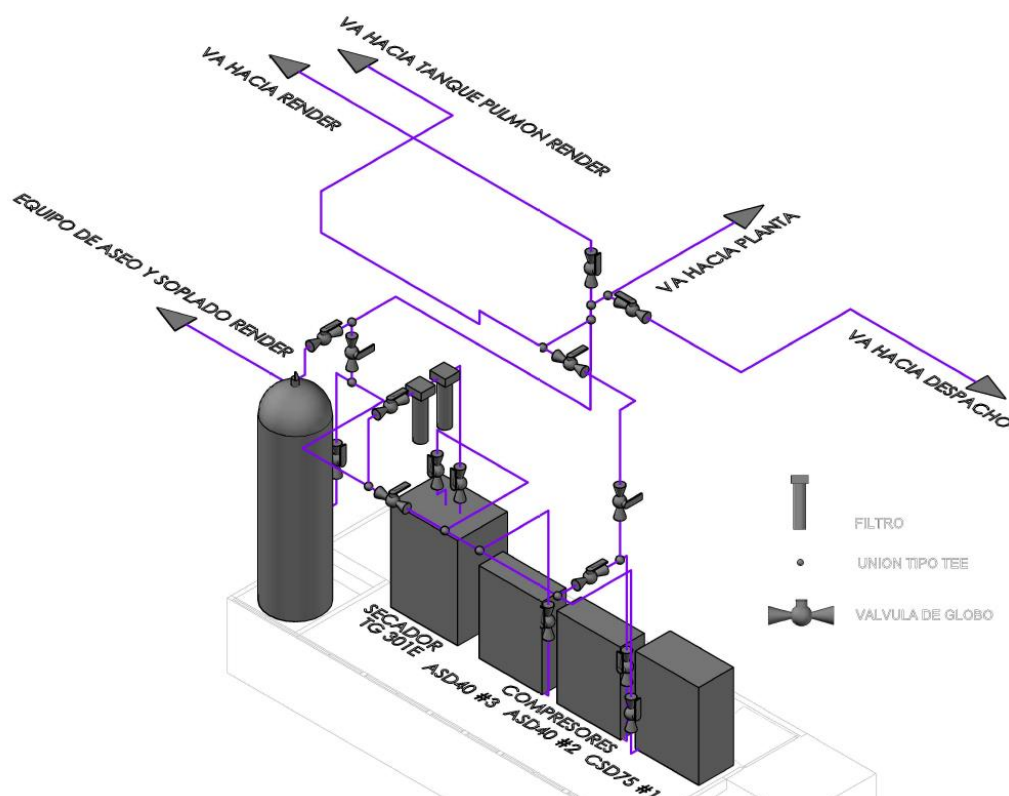


Figura 39. Vista isométrica del cuarto de compresores de la planta PIPASA SR.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una auditoría, la cual se adjunta en la sección de apéndices, con los requerimientos técnicos necesarios que establece Kaeser para el correcto diseño de un cuarto de compresores y los resultados arrojaron 8 incumplimientos, principalmente con las tuberías de recolección de condensados y su posterior tratamiento. El punto más crítico que se detectó es el tratamiento del agua condensada, ya que esta es dispuesta al ambiente sin realizarle un tratamiento de separación de aceite, siendo esto un incumplimiento ambiental de la disposición final de las aguas.

4.2.2 Tratamiento de aire

El sistema de aire comprimido de la planta cuenta con un sistema de tratamiento de aire conformado por un secador de aire refrigerativo y, posteriormente, por un filtrado para eliminar el aceite y particulado.

Secador de aire refrigerativo:

El secador de aire instalado en el cuarto de compresores es de la marca Kaeser modelo TG 301E con una capacidad de 30,8 m³/min (1088 CFM) a una presión de trabajo de 7 bar; al 100% de capacidad consume 3,1 kW y al 40% consume 1,3 kW, esto corresponde a cerca del 3% del consumo de los compresores. El circuito interno de refrigeración se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Esquema del circuito interno de refrigeración.

Fuente: Catálogo de secador.

Durante la evaluación del sistema actual y con ayuda de los técnicos de mantenimiento de Kaeser, se detectó que la conexión del secador de aire se encuentra invertida, como se muestra en la Figura 41; la entrada de aire comprimido realmente se encuentra en la salida del secador. Esto provoca que, en el separador de condensado del circuito interno del equipo de secado, no se condense el agua en el recipiente correcto, lo cual ocasiona que toda el agua extraída del aire viaje por la tubería hasta el tanque de aire ubicado en el mismo cuarto de compresores, dado que este no cuenta con una purga automática, el condensado sigue por las

tuberías mezclado con el aire y llega, finalmente, a los equipos de proceso. En la Figura 42 se muestra una foto del proceso de purga manual que se realizó al tanque de aire comprimido ubicado en el cuarto de compresores.



Figura 41. Conexión del secador de aire indicando la correcta disposición de tuberías.

Fuente: elaboración propia



Figura 42. Purga manual del tanque de aire comprimido 1 del cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

Sistema de filtrado:

El sistema de filtrado está compuesto por dos filtros marca Kaeser conectados en serie a la salida del secador de aire.

Filtro modelo F142KE: tipo coalescente extrafino, con una capacidad máxima de 500 CFM, filtra sólidos y líquidos en aerosol, además de partículas sólidas. La caída de presión es de menos de 140 mbar. La filtración de contenido de aerosoles en la entrada es de 10mg/m³, menos de 0,01 mg/m³ de aerosol residual. Cuenta, además, con un sistema de purga automática para eliminar el condensado que se produce, el cual es una mezcla de aceite y agua; este debe ser tratado antes de disponerse a un cuerpo de agua o afluyente. En la Figura 43 se muestra el dato de placa de dicho filtro.

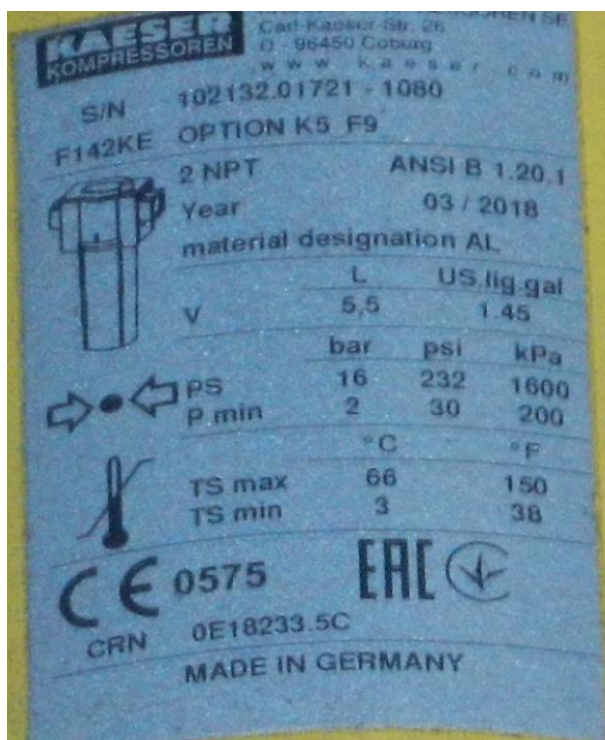


Figura 43. Datos de placa del filtro F142KE ubicado en el cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

Filtro modelo F142KA: tipo absorbente de vapor, con una capacidad máxima de 500 CFM, remueve vapores de aceite. Presenta una caída de presión de menos de 40 mbar, el medio filtrante es carbón de alta eficiencia. En la Figura 44 se muestra el dato de placa de dicho filtro.



Figura 44. Datos de placa del filtro F142KA ubicado en el cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 45 se muestran las distintas configuraciones que ofrece Kaeser con sus accesorios y equipos para el tratamiento de aire y cada una de ellas se encuentra referenciada a la clasificación ISO 8573-1 de acuerdo con el uso y aplicación que se le da al aire comprimido. En este caso se tiene una combinación de secador de aire y filtros KE y KA, lo cual corresponde a una calidad ISO 1.4.1, adecuada para la industria alimenticia, ya que permite la eliminación de partículas sólidas, aceite líquido y en vapor, según la clasificación industrial de la Figura 14.

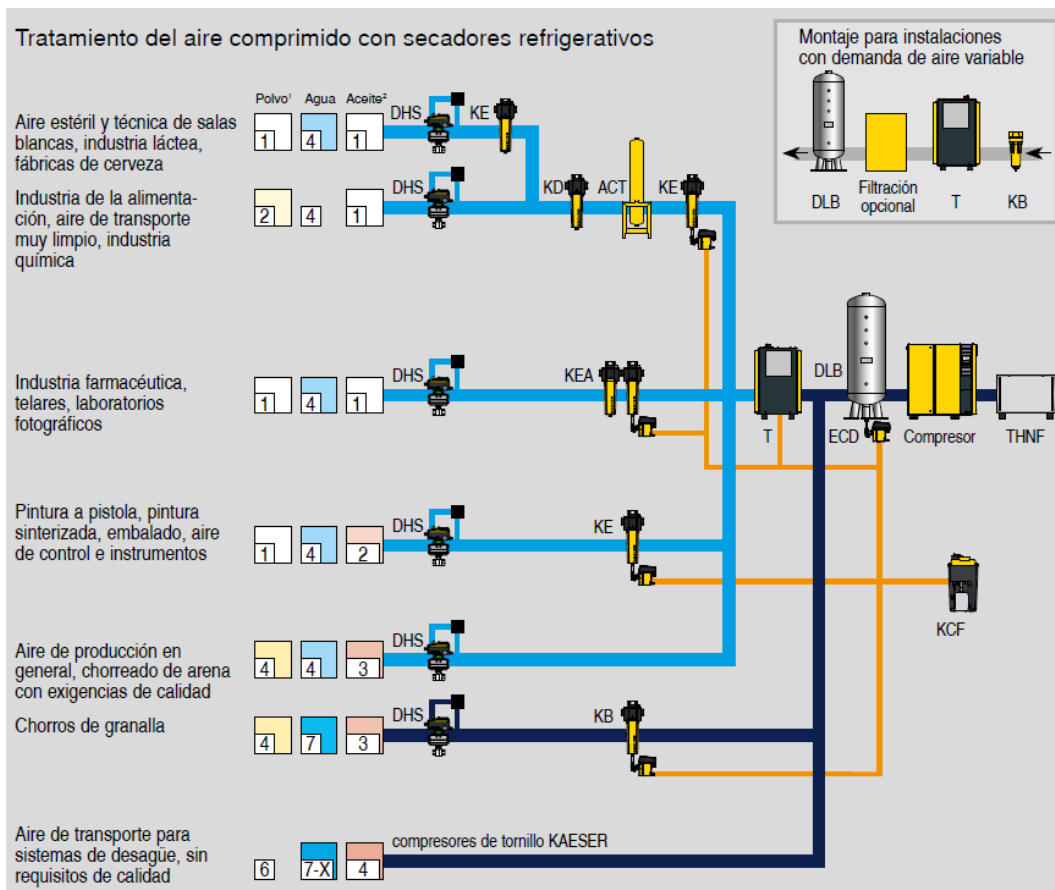


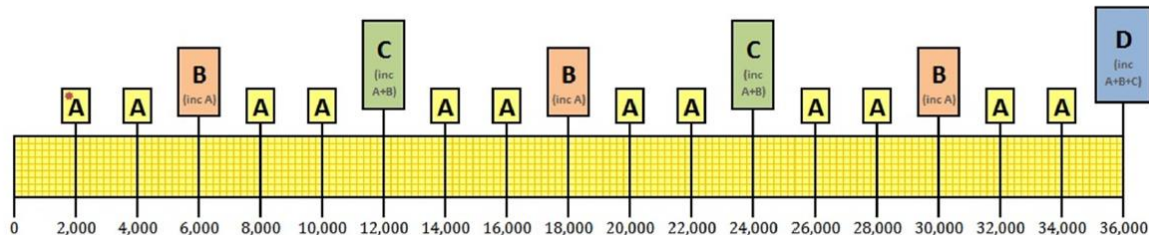
Figura 45. Clasificación ISO 8573-1 según la configuración de tratamiento de aire.

Fuente: Kaeser Compressors (s.f.).

4.2.3 Convenio de mantenimiento con Kaeser.

El tema del mantenimiento preventivo y correctivo de los compresores y el secador de aire es subcontratado, la empresa Kaeser Costa Rica se encarga de ello. Este convenio incluye un cronograma detallado de mantenimientos según las horas de uso; dichos mantenimientos se clasifican en A, B, C y D, además de visitas de inspección periódica y visitas de emergencia. Tiene una validez por dos años y culmina en agosto del 2020, el monto acordado es de \$1 730 por mes. Y no incluye las revisiones ni cambios de los filtros del sistema de tratamiento de aire, los cuales también son de la marca Kaeser.

Paquetes de Mantenimiento COMPRESORES DE TORNILLO



Nota: Los intervalos de Mantenimiento aplican a condiciones normales de operación.
Condiciones ambientales desfavorables, como una atmósfera sucia o polvorienta, reducen los intervalos de mantenimiento.

Figura 46. Cronograma de mantenimiento para compresores Kaeser

Fuente: Kaeser Compresores de Costa Rica (2017).

4.2.4 Sistema de tuberías

Como se describió en la sección anterior, el sistema de tuberías de la planta PIPASA SR a la salida del tanque pulmón 1 con un volumen de 3.55 m³ se divide en diferentes ramales, los cuales se dirigen a las distintas áreas de proceso. Un ramal se dirige hacia el tanque pulmón 2 ubicado en *rendering* con un volumen de 3.23 m³, este tanque pulmón alimenta principalmente el *blow tank* y las compuertas tipo cuchilla de los silos. Una tubería de una pulgada y otra de media pulgada se dirigen hacia el área de *rendering* para alimentar el resto de los equipos. Existe una tubería que se dirige a la zona de despacho, sin embargo, esta no cuenta con equipos alimentados.

Finalmente, se encuentra la tubería principal de dos pulgadas en hierro galvanizado que se dirige hacia los procesos de primario y secundario. Dicha tubería se ramifica hacia eviscerado, el área de desplume, escaldado y andén de carga. Continúa hacia secundario, donde se forma un anillo sobre el techo y otro anillo en confinado de secundario. Este anillo tiene una salida mediante una tubería, la cual se dirige al Departamento de Mantenimiento.

Con el paso de los años la red de las tuberías se ha modificado, por lo que a lo largo de la planta existen tuberías que no están en uso. Se desconoce el estado interior de la tubería, sin embargo, se ha encontrado en un filtro ubicado en el techo presencia de corrosión y harina del área de *rendering*, como se puede apreciar en la Figura 47.



Figura 47. Presencia de óxido y harina de render en filtro ubicado en el techo de la planta.

Fuente: elaboración propia.

En el CD adjunto a la entrega de este proyecto se encuentran los planos de la red de tuberías de la planta, donde se muestra con detalle cada ramal y anillo.

Se realizó un registro de presiones de la red con el fin de determinar la caída de presión en el punto más alejado, en la Figura 48 se muestran los datos y los resultados del cálculo de la caída de presión donde se tiene en promedio un 9,22% con respecto al punto más alejado de la red, ubicado en el Departamento de Mantenimiento.

De acuerdo con Garro (2017), se tiene como valor permitido un 4% de caída de presión hasta el punto más alejado, por lo tanto, se tiene un 5,22% o 5,7 psi de sobrepresión y considerando que teóricamente se estima que por cada bar que se aumente la presión, el consumo de energía del compresor aumenta en un 6% (Kaeser Compressors, 2010), es decir, se tiene un aproximado de 2,34% de pérdidas de energía asociados a la pérdida de presión en la tubería. Más adelante se estima el costo energético asociado.

	Fecha	14/3/2019	15/3/2019	15/3/2019	18/3/2019	18/3/2019	21/3/2019	25/3/2019	25/3/2019	27/3/2019	28/3/2019
	Hora	15:43	07:30	08:40	07:00	10:40	14:53	09:30	15:20	10:20	08:45
Ubicación	CSD 75 #1	107	94	98	101	100	114	109	109	108	109
	ASD 40 #2	106	93	97	101	99	114	109	109	107	109
	ASD 40 #3	105	92	97	100	99	114	109	109	107	109
	Tanque 1	97	82	90	92	92	106	105	104	103,2	105
	Tanque 2	105	95	87	100	95	110	105	105	102	105
	Mntto	98	86	92	90	90	102	98	98	98	100
Caída de presión (ΔP)	CSD 75 #1	8,41%	8,51%	6,12%	10,89%	10,00%	10,53%	10,09%	10,09%	9,26%	8,26%
	Mntto										
	Tanque 1	-1,03%	-4,88%	-2,22%	2,17%	2,17%	3,77%	6,67%	5,77%	5,04%	4,76%
	Mntto										

Figura 48. Registro de presiones de la red de aire comprimido para estimar la caída de presión.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al cumplimiento del código de colores, la tubería actual no lo cumple en su totalidad, ya que solo en una sección que se ubica en el confinado de cortes y el cuarto de compresores, la tubería se encuentra pintada de color celeste como corresponde de acuerdo con el Decreto N°12715-MEIC.

4.2.5 Equipos consumidores de aire comprimido

Los equipos que consumen aire comprimido en la planta PIPASA SR se agruparon en tres áreas, de acuerdo con el proceso productivo, las cuales corresponden a:

- Primario
- Secundario
- Rendering

Para determinar el consumo de aire comprimido de cada equipo se procedió a buscar en las especificaciones técnicas de cada uno, en manuales de mantenimiento, mediante cálculos aproximados o estimación mediante el equipo de medición SAM de Kaeser. En el caso de pistones de simple y doble efecto, se realiza el cálculo mediante la Ecuación 2, a continuación, se hace un cálculo de muestra para el equipo Hopper de secundario, el cual cuenta con dos pares de pistones FESTO DSNU 40-400-PP y trabaja a una presión de 6 bar (90 psi):

Presión de trabajo en bar															
Diámetro cilindro, mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Consumo de aire en litros por cm de carrera del cilindro															
6	0,0005	0,0008	0,0011	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025	0,0027	0,0030	0,0033	0,0036	0,0038	0,0041	0,0044
12	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,018
16	0,004	0,006	0,008	0,010	0,011	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,029	0,032
25	0,010	0,014	0,019	0,024	0,029	0,033	0,038	0,043	0,048	0,052	0,057	0,062	0,067	0,071	0,076
35	0,019	0,028	0,038	0,047	0,056	0,066	0,075	0,084	0,093	0,103	0,112	0,121	0,131	0,140	0,149
40	0,025	0,037	0,049	0,061	0,073	0,085	0,097	0,110	0,122	0,135	0,146	0,157	0,171	0,183	0,195
50	0,039	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153	0,172	0,191	0,210	0,229	0,248	0,267	0,286	0,305
70	0,076	0,113	0,150	0,187	0,225	0,262	0,299	0,335	0,374	0,411	0,448	0,485	0,523	0,560	0,597
100	0,155	0,231	0,307	0,383	0,459	0,535	0,611	0,687	0,763	0,839	0,915	0,991	1,067	1,143	1,219
140	0,303	0,452	0,601	0,750	0,899	1,048	1,197	1,346	1,495	1,644	1,793	1,942	2,091	2,240	2,389
200	0,618	0,923	1,227	1,531	1,835	2,139	2,443	2,747	3,052	3,356	3,660	3,964	4,268	4,572	4,876
250	0,986	1,441	1,916	2,392	2,867	3,342	3,817	4,292	4,768	5,243	5,718	6,193	6,668	7,144	7,619

$$Q_{Hopper} = 2 \text{ efectos} * 40 \text{ mm} * 40 \text{ cm} * 0,085 \frac{l}{cm} * 4 \frac{acc}{min} * 2 \text{ pistones}$$

$$Q_{Hopper} = 54,4 \frac{l}{min} = 1,922 \text{ CFM}$$

En el caso del *blow tank* de vísceras ubicado en *rendering*, se estimó mediante datos del SAM el consumo de aire comprimido. Para ello se tomaron los datos de producción de *rendering*, donde se anota la hora de descarga del *blow tank* para ir a la escala de tiempo del SAM y ver el consumo de aire comprimido de la planta en ese instante. Se toman los datos de consumo máximo, antes y después de la descarga. Esto para promediar los resultados de antes y después, y restarlo al consumo máximo con el fin de obtener una aproximación del flujo del equipo, en la Figura 49 se muestran los resultados obtenidos. Se obtiene un flujo promedio de 918 CFM durante 4 minutos y la presión de la red cae hasta los 60 psi.

Datos rendering		Datos SAM								Consumo Promedio
Fecha	hora descarga	Hora evento	Duración del evento (min)	presión mínima (psi)	demanda max aire (CFM)	Consumo antes (CFM)	Consumo despues (CFM)	promedio antes y despues (CFM)	Consumo blow tank (CFM)	
25-mar-19	19:55	19:51	3	66	1580	330	355	342,5	1237,5	918
25-mar-19	21:00	20:51	3,67	54	1625	391	408	399,5	1225,5	
25-mar-19	22:00	21:53	3,33	66	1489	420	418	419	1070	
25-mar-19	00:25	00:20	2,67	71	1752	498	430	464	1288	
25-mar-19	01:30	01:28	3,8	60	1660	437	412	424,5	1235,5	
25-mar-19	02:30	02:23	2,5	71	1540	477	414	445,5	1094,5	
25-mar-19	05:15	05:07	1,5	79	956	316	329	322,5	633,5	
25-mar-19	06:15	06:09	1,5	78	1016	377	422	399,5	616,5	
25-mar-19	07:00	07:10	1,16	100	702	470	451	460,5	241,5	
25-mar-19	08:15	08:05	1,83	87	1147	460	460	460	687	
25-mar-19	10:35	10:32	5,67	76	1135	337	394	365,5	769,5	

Figura 49. Hoja de cálculo para estimar el consumo de aire del *blow tank* vísceras.

Fuente: elaboración propia.

4.2.6 Demanda de aire comprimido de la planta.

Para estimar la demanda de aire comprimido de la planta se procede a realizar una hoja de cálculo en la cual se ingresan por área los equipos, consumo de aire comprimido, número de máquinas, el ciclo de carga y el factor de simultaneidad para determinar el consumo probable de aire comprimido de esa área, a continuación, en la figura 50 se muestran los resultados:

Primario							
Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Consumo de aire. (m3/min)	número de maquinas	Ciclo de carga (%)	Factor de simultaneidad (%)	Consumo de aire calculado (m3/min)	Consumo de aire calculado (cfm)
Intercambiador 1	2	0,1416	1	85%	100%	0,1203	4,2500
Intercambiador 2	2	0,1416	1	85%	100%	0,1203	4,2500
Escaldadora de patas	4	0,0004	1	85%	100%	0,0003	0,0115
Deep tank	2	0,1416	1	85%	100%	0,1203	4,2500
Transfer	3	0,0002	1	85%	100%	0,0001	0,0046
Bomba de sangre	7	1,4158	1	75%	100%	1,0619	37,5000
Bomba de molleja	2	0,5663	1	75%	100%	0,4248	15,0000
Bomba de pescuezo	4	0,5663	1	75%	100%	0,4248	15,0000
Bomba de hígado	2	0,5663	1	75%	100%	0,4248	15,0000
Tensor línea de vicerado	3 - 5	0,0002	1	75%	100%	0,0001	0,0040
Divisor de mollejas	4	0,0015	1	75%	100%	0,0012	0,0407
Pistola para dedos	7	0,0147	1	10%	100%	0,0015	0,0519
Estación de químicos	4	0,2832	5	75%	83%	0,8814	31,1250
Sistema centralizado	4	0,5663	4	75%	70%	1,1893	42,0000
						4,7710	168,4877

Figura 50. Demanda de aire comprimido estimada para el área de primario.

Fuente: elaboración propia.

Secundario							
Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Consumo de aire. (m3/min)	número de maquinas	Ciclo de carga (%)	Factor de simultaneidad (%)	Consumo de aire calculado (m3/min)	Consumo de aire calculado (cfm)
Hopper	6	0,0544	1	50%	100%	0,0272	0,9606
Banda (ácido peracético)	6	0,0337	1	10%	100%	0,0034	0,1191
Clipadora	5 - 7	0,0420	6	60%	80%	0,1210	4,2717
Estación de químicos	4	0,2832	10	75%	71%	1,5079	53,2500
Gianco	5,5	0,1586	1	75%	100%	0,1189	4,2000
Inyectora Multijector 700	6	0,3333	1	75%	100%	0,2500	8,8278
Detector de metales	6	0,2832	1	75%	100%	0,2124	7,5000
Detector de metales KFC	6	0,2832	1	75%	100%	0,2124	7,5000
Compact	6	1,6990	1	75%	100%	1,2743	45,0000
Banda Seleccionadora KFC	6	0,2832	1	75%	100%	0,2124	7,5000
Flowline salida 1	7	0,200000566	1	75%	100%	0,1500	5,2972
Flowline salida 2	7	0,200000566	1	75%	100%	0,1500	5,2972
Flowline salida 3	7	0,100000283	1	75%	100%	0,0750	2,6486
Physics (se contempla por backup)	5	1,699014	1	100%	100%	1,6990	60,0000
						6,0137	212,3721

Figura 51. Demanda de aire comprimido estimada para el área de secundario.

Fuente: elaboración propia.

Rendering							
Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Consumo de aire. (m3/min)	número de maquinas	Ciclo de carga (%)	Factor de simultaneidad (%)	Consumo de aire calculado (m3/min)	Consumo de aire calculado (cfm)
Ciclón Carnicos	7	0,0009	2	100%	50%	0,0009	0,0309
Enfriador de harina	7	1,4158	1	60%	94%	0,7985	28,2000
Silos Carnicos	7	0,0036	2	60%	94%	0,0040	0,1425
COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (carga)	7	0,0026	4	60%	86%	0,0054	0,1892
COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (descarga)	7	0,0032	4	60%	86%	0,0065	0,2309
Blow tank víceras	2	25,9949	1	15%	100%	3,8992	137,7000
Blow tank víceras (cuchillas)	7	0,0009	2	60%	50%	0,0005	0,0185
Válvula de diafragma	7	0,0028	1	100%	100%	0,0028	0,1000
Ciclón plumas	7	0,0009	1	10%	100%	0,0001	0,0031
Silos plumas	7	0,0036	2	60%	94%	0,0040	0,1425
COOKER DE HARINA-PLUMAS (carga)	7	0,0026	4	60%	86%	0,0054	0,1892
COOKER DE HARINA-PLUMAS (descarga)	7	0,0052	4	60%	86%	0,0108	0,3815
Blow tank plumas (cuchillas)	7	0,000874291	2	60%	94%	0,0010	0,0348
Estación de químicos	4	0,283169	4	75%	70%	0,5947	21,0000
						5,3339	188,3630

Figura 52. Demanda de aire comprimido estimada para el área de *rendering*.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro Resumen		
Area de planta	Consumo de aire calculado (m3/min)	Consumo de aire calculado (cfm)
Primario	4,7710	168,4877
Secundario	6,0137	212,3721
Primario + Secundario	10,7848	380,8597
Rendering	5,3339	188,3630
Total aire planta	16,1186	569,2228
Sin contar la physics y blowtank víceras, corresponde al flujo promedio diario	10,5204	371,5228
Considerando un 35% de fugas	14,2025	501,5557

Figura 53. Cuadro resumen de cálculo estimado de aire comprimido de la planta.

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro resumen de la Figura 53 se muestra el total de aire comprimido demandado por la planta de forma estimada. Como se puede observar, primario demanda alrededor de 168 CFM, secundario 212 CFM y *rendering* 188 CFM, para un total de 569 CFM, tomando en cuenta el consumo de la physics (la cual trabaja con un compresor independiente), en caso de que se requiera suplir dicho equipo.

El consumo promedio diario del sistema se obtiene al restar el consumo de la physics y el *blow tank*, el cual se descarga aproximadamente cada hora, por lo tanto, se obtiene una demanda promedio de 371 CFM sin fugas, contemplando un 35% de fugas se obtienen 500 CFM. Dicho dato se corrobora con el equipo de

medición SAM del cual se extrae la gráfica de consumo. Dicha gráfica se muestra en la Figura 54, donde la demanda ronda los 300 a 500 CFM, lo cual concuerda con lo estimado mediante cálculos, toma como promedio un valor de 400 CFM. Existen picos de demanda de hasta 1600 CFM, en momentos cuando se descarga el *blow tank* hacia las cocinas.

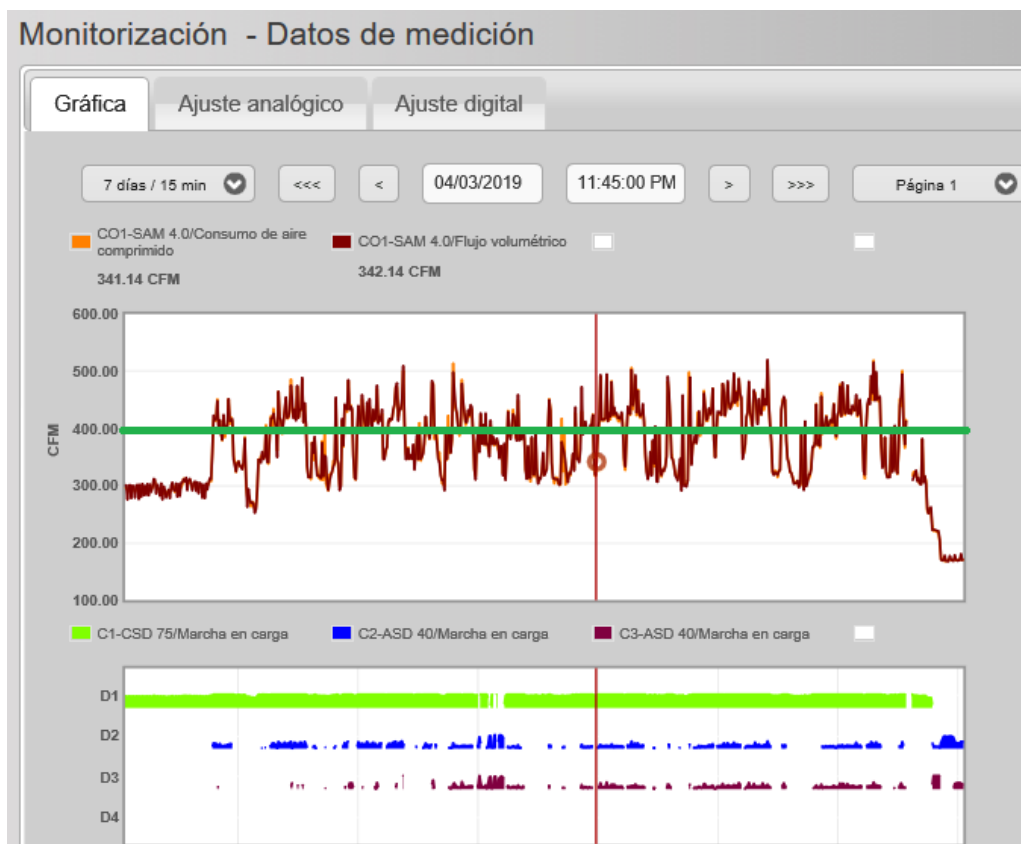


Figura 54. Gráfica de demanda de aire comprimido, obtenida del equipo de medición SAM Kaeser.
Fuente: elaboración propia.

4.2.7 Evaluación del diámetro actual de la tubería según la demanda de aire

Se realiza un análisis de la tubería instalada evaluando el flujo máximo que puede pasar por ella con una caída de presión mínima permisible. En este caso, se toma en cuenta el tramo de tubería desde el cuarto de compresores hasta el punto más alejado de la red (cuarto de mantenimiento) y con los datos de demanda de aire comprimido determinados en la sección anterior, se evalúa el factor de ampliación o saturación de la tubería.

Se utiliza la Ecuación 4, despejando el diámetro interno requerido para un caudal de aire determinado y queda la ecuación de la siguiente forma:

$$d = \sqrt[5]{\frac{450 Q_d^{1,85} L}{\Delta p P}}$$

Se despeja de la Ecuación 4 el caudal para determinar el flujo máximo de aire que puede pasar por la tubería, con el fin de determinar el porcentaje de ampliación o de saturación en caso de ser negativo.

$$Q_d = \sqrt[1,85]{\frac{d^5 \Delta p P}{450 L}}$$

Tramo	Presión	Caudal	Caudal	Caudal	Long. (m)	Long. Equi. (m)	Díametro			dP	Díametro adecuado	% Ampliación
	(bar)	(cfm)	(l/s)	(m3/s)			(in)	(mm)	Interno (mm)			
A-B	7	380	179,36	0,179233	47	92,61	2	50	52,50	0,03	76,2	-173%
B-C	7	270	127,44	0,12735	14	59	2	50	52,50	0,03	61,3	-52%
C-D	7	270	127,44	0,12735	4	11,78	1,25	32	35,05	0,05	40,1	-44%
D-E	7	270	127,44	0,12735	10	15,38	1,25	32	35,05	0,05	42,3	-66%
E-F	7	270	127,44	0,12735	6,5	36,46	1,25	32	35,05	0,05	50,3	-165%
F-G	7	270	127,44	0,12735	3	10,78	1,25	32	35,05	0,05	39,4	-37%
G-H	7	270	127,44	0,12735	9	31,18	1,25	32	35,05	0,05	48,7	-144%
H-I	7	10	4,72	0,004717	44	90,76	0,5	13	15,80	0,02	21,4	-128%
Render	7	50	23,6	0,023583	35,23	58,08	1	25	26,64	0,03	32,8	-33%
Blow tank	7	918	433,296	0,43299	29	44,61	2	50	52,50	0,05	82,4	-238%

Figura 55. Evaluación del tramo principal de tubería de la red de aire comprimido.

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 55 que los tramos de tubería presentan una condición de saturación, es decir, se supera el caudal máximo de aire que puede fluir, esto conlleva a un aumento en la velocidad del aire y, por ende, mayores pérdidas de presión. Por lo tanto, se debe aumentar el diámetro al valor adecuado que se muestra en dicha figura, para mejorar el flujo en dichos tramos de tubería y evitar un alta caída de presión que incurre en pérdidas de energía. Además, se ve imposibilitada una ampliación de la red de aire comprimido. Dadas estas condiciones de saturación y los planes futuros de ampliación de la planta, es necesario considerar un rediseño de la red de aire comprimido.

4.2.8 Uso y consumo de energía

El servicio eléctrico de la planta es suplido por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), y el modelo tarifario corresponde al de media tensión (T-MT),

el cual posee costos de demanda y energía distintos según el periodo horario, estos periodos están definidos de la siguiente forma:

Punta: de 10:00 a 12:30 y de 17:30 a 20:00

Valle: de 6:01 a 10:00 y de 12:30 a 17:30.

Noche: de 20:00 a 6:00.

El monto establecido para los meses de enero, febrero y marzo del 2019 se muestran en la Tabla 3 y para los meses de abril, mayo y junio del 2019 se encuentran en la

Tabla 4.

Tabla 3. Tarifa eléctrica MT CNFL para los meses de enero, febrero y marzo del 2019.

Tarifa Media Tensión TMT	
Consumo de energía por cada kWh	
Energía Punta	₡ 54,42
Energía Valle	₡ 27,21
Energía Noche	₡ 19,59

Tabla 4. Tarifa eléctrica MT CNFL para los meses de abril, mayo y junio del 2019.

Tarifa Media Tensión TMT	
Consumo de energía por cada kWh	
Energía Punta	₡ 61,88
Energía Valle	₡ 30,94
Energía Noche	₡ 19,59

El equipo de medición SAM no cuenta con la capacidad de ingresar los tres periodos tarifarios, únicamente se pueden ingresar dos, por lo tanto, se calcula el promedio de los tres periodos y se digita este valor en el SAM para estimar el costo energético asociado a la producción de aire comprimido. Para los meses de enero, febrero y marzo, el promedio es de ₡ 33,74 y para los meses de abril, mayo y junio el costo promedio es de ₡ 38,37 para el año 2019.

El equipo de medición SAM desarrolla un informe de consumo de energía de la estación de generación, donde se muestran los datos de horas de carga y vacío de cada compresor, consumo de energía y costo, además, se muestran los gráficos. Este estudio se toma para una semana completa de producción y se proyectará a un año.

En la Figura 56 se muestran los datos de la semana del 24 al 31 de marzo del 2019. El costo energético que reporta el SAM se calcula con la tarifa promedio de los periodos y no toma en cuenta el consumo energético del secador de aire, este se estima en 3% del consumo de los compresores. Se realiza el cálculo aproximado promediando las horas de uso según el porcentaje que corresponde a cada periodo y se obtiene el costo energético del sistema de aire comprimido incluyendo el secador, estos datos se muestran en la Figura 57.

Del consumo y costo energético total de la planta, el 4,51% corresponde al sistema de aire comprimido. Proyectando estos datos a un año, el sistema de aire comprimido consume en energía cerca de 20 millones de colones. Durante esta semana el equipo estuvo trabajando en un rango de presiones de 6,8 bar (100 psi) a 8,5 bar (125 psi).

Con respecto al uso de los compresores, se tiene que, en total, el 84,9% se encuentra en carga y el 15,1% en vacío. El compresor más utilizado es el CSD 75 con un 71% de utilización, mientras que el C2 (ADS-40) se utiliza cerca del 10% del tiempo.

Reporte energético del SAM para la semana del 24 al 31 de marzo								
Compresor	Energía (kWh)			costo energía (¢/kWh)			Volumen (m3)	Potencia específica (kW/100 CFM)
	marcha	vacío	total	marcha	vacío	total		
C1-CSD 75	9922,5	91,8	10014,3	¢ 334 784,14	¢ 3 098,01	¢ 337 882,14	94576,3	18,0
C2-ASD 40	750,5	92,1	842,6	¢ 25 322,21	¢ 3 107,12	¢ 28 429,32	7137,8	20,1
C3-ASD 40	1480,7	260,8	1741,5	¢ 49 957,47	¢ 8 799,73	¢ 58 757,20	14171,6	20,9
Total	12153,6	444,7	12598,4	¢ 410 063,81	¢ 15 004,85	¢ 425 068,67	115885,6	18,5

Figura 56. Reporte energético de la semana del 24 al 31 de marzo del sistema de aire comprimido.

Fuente: Sigma Air Manager 4.0, Kaeser.

Costo Energético compresores			
	Kwh	Costo	total
Punta	2624,66	₪ 53,64	₪140 787
Valle	4724,39	₪ 27,21	₪128 551
Nocturna	5249,32	₪ 19,59	₪102 834
	12598,36		₪372 171
Costo Energético secador de aire (3%)			
	Kwh	Costo	total
Punta	78,74	₪ 53,64	₪ 4 224
Valle	141,73	₪ 27,21	₪ 3 857
Nocturna	157,48	₪ 19,59	₪ 3 085
	377,95		
Total	12976,31	Total	₪ 11 165

Costo total sistema aire comprimido (semanal)	₪ 383 336	Costo Energético anual del sistema aire comprimido.	₪19 933 495
Costo energético total de la planta PIPASA SR (semanal)	₪ 8 294 190	% según kWh	4,51%
		%según Costo	4,62%

Figura 57. Costo energético total del sistema de aire comprimido del 24 al 31 de marzo.

Fuente: elaboración propia.

Compresor	Hora de trabajo (h)			Porcentajes (%)		Utilización
	marcha	vacío	total	marcha	vacío	marcha
C1-CSD 75	161,0	4,0	165,0	97,58%	2,42%	71,24%
C2-ASD 40	22,0	8,0	30,0	73,33%	26,67%	9,73%
C3-ASD 40	43,0	28,0	71,0	60,56%	39,44%	19,03%
Total	226,0	40,0	266,0	84,96%	15,04%	100,00%

Figura 58. Estudio de utilización de los compresores instalados del 24 al 31 de marzo.

Fuente: elaboración propia.

Para la siguiente semana se cambió el rango de presiones y ahora se descarga de 6,8 bar (100 psi) a 7,5 bar (115 psi), en la Figura 59 se muestra el reporte energético del SAM. Comparando las horas de uso se puede observar que el trabajo de los compresores se redujo de 226 h a 170 h, por lo tanto, los compresores trabajaron 56 horas menos. La potencia específica bajó de 0,185 kW/CFM a 0.183 kW/CFM. Esto significa un ahorro energético de ₪70 570 a la semana.

Para la semana del 7 al 14 de abril se mantuvieron los parámetros de presión de la semana anterior. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 59, en comparación con la semana anterior, sí hubo un leve aumento en las horas de marcha, pero con respecto a la semana del 24 al 31 de marzo, sigue habiendo una

gran reducción en las horas de uso; los compresores trabajaron 48 horas menos, esto corresponde a un ahorro de ₡61 570.

Se continuaron las mediciones hasta la semana del 28 de abril al 5 de mayo, los cambios que se realizaron fueron la eliminación del soplado del tamiz de harina y se redujo la presión del sistema a 96 psi sin afectar el proceso. En la Figura 59 se muestra el resumen del reporte de energía semanal, donde se estableció el indicador de kWh/ave, de tal forma que se pueda generar una tendencia del sistema y se relacione con la cantidad de aves procesadas, para tomar decisiones que mejoren el rendimiento del sistema, como se recomienda en la ISO 50001 para sistemas de gestión de energía.

Proyectando los ahorros obtenidos desde la situación inicial hasta la situación más favorable, se obtienen los ahorros, los cuales se muestran en la Figura 60. Se obtuvo un ahorro energético proyectado a un año de \$9 000, en términos de la huella de carbono se evitará enviar cerca de 4,2 Ton de CO² al ambiente, se mejoró el indicador de producción en un 40% y se redujeron las horas de carga de los compresores.

Cuadro Resumen						
Descripción	24 al 31 marzo	31 de mar al 7 de abril	7 al 14 de abril (SS)	14 al 21 de abril	21 al 28 de abril	28 de abr al 5 de mayo
Horas en carga	226,0	170,0	178,0	175,0	153,0	165,0
Energía semanal (kWh)	12598,4	9248,6	9820,9	9073,4	7965,1	8467,6
Potencia específica (kW/100 cfm)	18,473	18,323	18,368	18,330	18,493	18,364
Costo aire Semanal	₡ 383 336	₡ 321 766	₡ 341 676	₡ 315 672	₡ 277 113	₡ 294 595
Costo aire Anual	₡ 19 933 495	₡ 16 731 836	₡ 17 767 161	₡ 16 414 968	₡ 14 409 863	₡ 15 318 947
Costo general planta semanal	₡ 8 294 190	₡ 7 266 367	₡ 8 530 526	₡ 7 842 891	₡ 6 494 338	₡ 8 989 162
Indicador producción (kWh/ave)	0,0204	0,0142	0,0148	0,0175	0,0121	0,0128
Comentarios		Se bajó la presión máxima (de 125 a 110 psi)			Se eliminó el uso en el tamiz	Se bajó la presión mínima de 100 a 96 psi

Figura 59. Cuadro resumen del estudio de energía semanal.

Fuente: elaboración propia, SAM.

Descripción	Ahorro	
Horas en carga	73,0	
Energía semanal (kWh)	4633,3	
Costo aire Semanal	₪ 106 224	\$176
Costo aire Anual	₪ 5 523 632	\$9 145
Mejora en indicador producción	40,78%	
Toneladas de CO2 (año)	4,2	

Figura 60. Cuadro resumen de ahorros del estudio de energía semanal.

Fuente: elaboración propia.

4.2.9 Deficiencias detectadas, costos asociados y oportunidades de mejora.

A partir de los resultados de la evaluación de la red de aire comprimido, se identificaron ciertas aplicaciones del aire comprimido, las cuales afectan la eficiencia del sistema, ponen en riesgo el proceso productivo o representan una aplicación inadecuada, a continuación, se muestra cada una de ellas junto con los costos asociados y las acciones correctivas propuestas.

4.2.9.1 Caída de presión debido a la descarga del blow tank de vísceras

Como se mostró en la Figura 49, el *blow tank* de vísceras demanda un flujo de aproximadamente 918 cfm en un corto periodo de tiempo, esto conlleva a una caída en la presión de hasta 50 psi en toda la red de aire comprimido, lo cual ocasiona que los equipos de proceso no operen dentro de los parámetros de establecidos por el fabricante, esto puede estar afectando el proceso productivo; sin embargo, no se cuantifica la afectación, ya que dichos problemas no provocan paros mayores de producción, pero sí se puede estar influyendo en retrabajos o pérdida de producto por caída al suelo o se está incurriendo en una mala selección del pollo por peso, debido al mal funcionamiento de los descolgadores (pistones de la GAINCO), pero el Departamento de Producción no detecta los problemas o no los registra, por lo tanto, no se tiene cuantificada monetariamente la afectación.

Cada descarga del *blow tank* se registra en el control de producción de la harina de *rendering*, estas descargas ocurren aproximadamente cada hora. Al descargar este equipo, provoca que los tres compresores trabajen a plena carga por un tiempo de 3 a 4 minutos para compensar el faltante de aire, después la red se estabiliza y continúa únicamente el compresor CSD 75 (C1), con arranques

ocasionales de un compresor ASD 40, por lo tanto, es normal el uso de los dos compresores, mientras que el uso del tercer compresor genera un sobre costo aproximado de \$573 al año.

Compresor	Potencia específica por compresor (kW/cfm)	Potencia por compresor (kw)	Tiempo evento (h)	Energía consumida por descarga (kWh)	Energía promedio diaria (kWh)	Energía promedio semanal (kWh)
C1-CSD 75	0,17848	61,75	0,050	3,09	43,23	259,37
C2-ASD 40	0,18032	34,98		1,75	24,49	146,92
C3-ASD 40	0,20798	40,35		2,02	28,24	169,46
Total				6,85	95,96	575,75

Tarifa T-MT		
Periodo	Energía (kWh)	
Punta	€61,88	
Valle	€30,94	
Noche	€22,28	Tipo de cambio
Costo energético por usar a plena carga los 3 compresores		1/5/2019
		\$598,90
Costo energía punta	€694 739	\$1 160
Costo energía valle	€192 983	\$322
Costo energía noche	€277 936	\$464
Costo anual	€1 165 658	\$1 946

Costo al usar el compresor #1 y #2		
Costo energía punta	€490 256	\$819
Costo energía valle	€136 182	\$227
Costo energía noche	€196 131	\$327
Costo anual	€822 569	\$1 373

Ahorro al no usar un compresor ASD 40		
Costo energía punta	€204 483	\$341
Costo energía valle	€56 801	\$95
Costo energía noche	€81 805	\$137
Costo anual	€343 089	\$573

Figura 61. Costo energético debido a la descarga del blow tank vísceras.

Fuente: elaboración propia, SAM)

La acción correctiva propuesta es instalar un tanque de 3 m³ del que dispone la empresa, el cual se ubica en las bodegas de la Garita. Este tanque permitiría aumentar el reservorio de aire actual de 6,78 m³ (sumando el volumen de los tanques pulmones #1 y #2) a 9,78 m³, lo cual permite almacenar una mayor cantidad de aire que compense el faltante que generan las caídas de presión en cada descarga y que afectan los equipos de proceso. Además, al compensar los picos de consumo de aire comprimido y mantener la presión, reducirá el trabajo de los compresores y las afectaciones que se pudieran dar en planta. Esta corrección se agrega al proyecto de diseño de la red y a la cotización del mismo.

Otra de las acciones correctivas propuestas es la de instalar una válvula reguladora de flujo y presión en la tubería que se dirige al *blow tank*, justamente entre dicho equipo y el tanque pulmón. Esta válvula permitiría reducir la presión a 3 bar (45 psi), que es la de operación del *blow tank*, permitiendo entregar el caudal y presión que requiere este equipo de forma proporcional, minimizando la caída de presión que afecta el resto de la red.

4.2.9.2 Costos de afectación por condensados

Debido al problema detectado con el secador de aire, donde la conexión se encuentra invertida, se presentan problemas de condensados en la tubería, los cuales llegan a afectar los equipos de planta, la inocuidad del proceso productivo y la integridad física, además, corroen la tubería existente de hierro galvanizado. En la Figura 42 y la Figura 62 se observa la presencia de condensado en el tanque 1 y en las unidades de mantenimiento de planta. En el Departamento de Calidad y de acuerdo con la clasificación industrial de aire comprimido, para la industria alimenticia debe cumplirse con una calidad ISO 8573:2010 clase 1.4.1, debido a este problema no se cumple la política de inocuidad alimentaria de Cargill, poniendo en riesgo el proceso productivo y la calidad final del producto.

En el caso de secundario, se encuentra el equipo GAINCO, el cual consta de pistones neumáticos que seleccionan el pollo por peso, dichos pistones debido a la presencia de condensado tienden a fallar prematuramente en los sellos y comienzan a fugar aire; esto provoca un costo asociado a mantenimiento por reemplazo del pistón neumático y un costo energético asociado a fugas de aire comprimido.

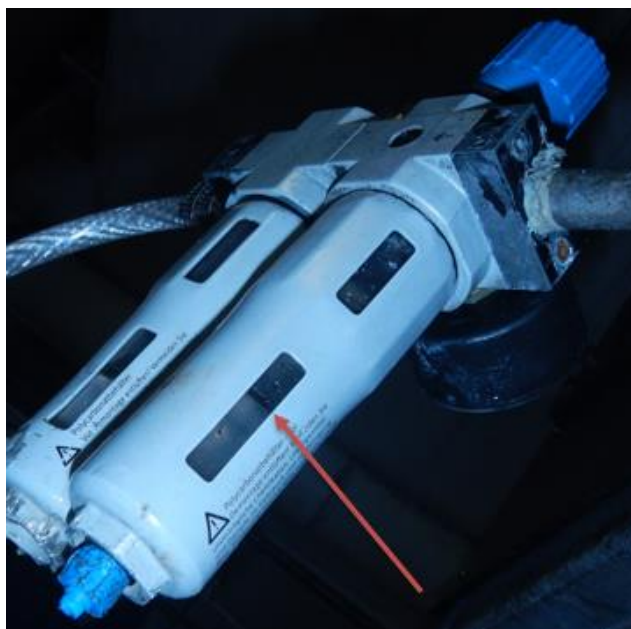


Figura 62. Unidad de mantenimiento con presencia de condensado.

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los datos del almacén de repuestos, para el periodo que comprende el año 2018 e inicios del 2019, se retiraron 25 pistones con un costo total de \$1 620.

Otro equipo afectado por los condensados es la inyectora multiyector 700, en la cual, debido a los contaminantes de la red (agua, aceite y partículas), falló una válvula tipo regulador-silenciador, provocando un paro del área de marinados de alrededor de 480 minutos, la afectación no fue crítica debido a que se encontraba en muy baja producción, sin embargo, esta misma falla durante un periodo de alta producción puede causar pérdidas considerables de producto no procesado. Se consultó al Departamento de Producción por el costo asociado, sin embargo, no se contaba con los datos.

Las clipadoras también presentan problemas frecuentes, ya que estos equipos se dañan por el condensado y por la falta de unidades de mantenimiento en los puntos de toma, sin embargo, nuevamente no existen registros para estimar el costo asociado.

Esta afectación por condensados repercute en la tubería, ya que el problema tiene alrededor de 2 años, por lo tanto, ha causado durante todo ese tiempo daño estructural por corrosión en las tuberías, lo cual debilita la paredes y genera mayores posibilidades de ruptura y fugas. También el óxido se desprende y llega hasta los filtros de las unidades de mantenimiento o en el peor de los casos a los equipos.

Por otra parte, se cotizaron los materiales con el proveedor Kaeser para corregir la instalación del secador de aire, estos tienen un costo de \$1 405. Dicho trabajo se realizará con personal interno de mantenimiento.

Adicional al cambio en la conexión de la tubería, se cotizó la instalación de una purga automática por parte de la empresa ENERZA, ya que requiere una acometida eléctrica desde el cuarto de control de motores de render. Esta instalación tiene un costo de \$1 355, en la sección de anexos se encuentra la cotización.

En el análisis financiero realizado mediante los requerimientos de Cargill para proyectos, se obtiene que, para una inversión de \$2 760 y un ahorro de \$1 620 en

costos cuantificados de repuestos, se obtiene una IRR de 44.4% y un periodo de recuperación de 2,1 años, como se muestra en la Figura 63. Sin embargo, los beneficios que traen estas mejoras hacia el proceso productivo en cuanto a la disponibilidad de los equipos y a la calidad de aire justifican la inversión debido al riesgo latente de parar la producción.

AFECTACION DE LOS CONDENSADOS, MEJORAS Y CORRECCIÓN DEL SECADOR	
PROJECT COSTS AND FINANCIAL MEASURES:	
Capital Allocation	\$3
Incremental Operating Working Capital	\$0
Initial Start-up Expenses Before Tax	\$0
Total Funds Requested	\$3
Present Value of Free Cash Flows (Planning Horizon)	\$7
Present Value of Terminal Value	\$0
NPV	\$5
IRR	44,4%
Payback on Fixed Investment	2,1

Figura 63. Indicadores financieros para las mejoras y corrección del secador de aire del tratamiento de condensados.

Fuente: elaboración propia.

4.2.9.3 Costo debido al uso inapropiado en el tamiz de harina

En el área de *rendering* se cuenta con un tamiz de harina (Figura 64), en este equipo se debe asegurar que el producto final tenga una temperatura inferior a 35°C, con el fin de bajar la temperatura de la harina se utiliza el aire comprimido para soplar el interior del tambor. Otro uso que se le da al aire comprimido es el de limpiar los agujeros del tambor que llegan a obstruirse con el producto, por lo tanto, se sopla el aire a presión para limpiar la superficie. Esta salida de aire comprimido permanece abierta todo el periodo de producción, el cual en promedio corresponde a aproximadamente 16 horas al día.



Figura 64. Tamiz de harina del área de rendering.

Fuente: elaboración propia

Este uso que se le da al aire comprimido es inadecuado, ya que no se requiere aire a presión, la aplicación requiere mover una masa de aire que transporte el calor hacia el ambiente, para ello se cuenta con un ventilador, sin embargo, este se encuentra colocado a una distancia aproximada de 0,5 m de tamiz, por lo cual el flujo de aire no se direcciona hacia el interior del equipo. Se realizó la estimación del consumo de aire comprimido de esta aplicación, en la cual se utiliza una manguera y en ocasiones dos, de un cuarto de pulgada (unos 6 milímetros de diámetro) y se tiene un flujo de 1,26 m³/min (45 cfm) tomado de la Figura 29. Con ayuda del equipo de medición SAM, se verificó el flujo de aire comprimido al cerrar la válvula, este dato corresponde a 1,14 m³/min (40 cfm).

Se estimó el costo energético asociado a esta aplicación, el cual va de \$1 890 a \$3 780, los cuales son pagados en electricidad para suplir este uso. La acción correctiva tomada fue la eliminación de las mangueras y acercar más el ventilador al tamiz para direccionar el flujo de aire y lograr un mejor enfriamiento, con lo cual se logró cumplir con la temperatura máxima aceptada por calidad sin realizar inversión alguna.

Flujo Antes (CFM)	247,97
Flujo Despues (CFM)	208,38
Flujo fuga (CFM)	39,59
Potencia por fuga (kW)	7,34
Potencia por fuga (hp)	9,8

Horas de uso	
Punta	2,5
Valle	4,5
Noche	9
Total	16

Tarifa T-MT		
Periodo	Energía (kWh)	
Punta	€61,88	
Valle	€30,94	
Noche	€22,28	Tipo de cambio
Monto en tarifa de media tensión		1/5/2019
		\$598,90
Costo energia punta	€354 083,61	\$591
Costo energia valle	€318 675,25	\$532
Costo energia noche	€458 958,28	\$766
Costo anual 1 salida	€1 131 717	\$1 890
Costo anual 2 salidas	€2 263 434	€3 779

Figura 65. Cuadro resumen del costo debido al uso de aire comprimido en el tamiz de harina.

Fuente: elaboración propia

4.2.9.4 Fugas en la red de aire comprimido

Las fugas en la red de aire comprimido se estiman mediante el consumo mínimo de planta del domingo durante la madrugada, momento en el que la planta está detenida y no existen consumidores de aire comprimido, se realiza mediante la técnica de ultrasonido.

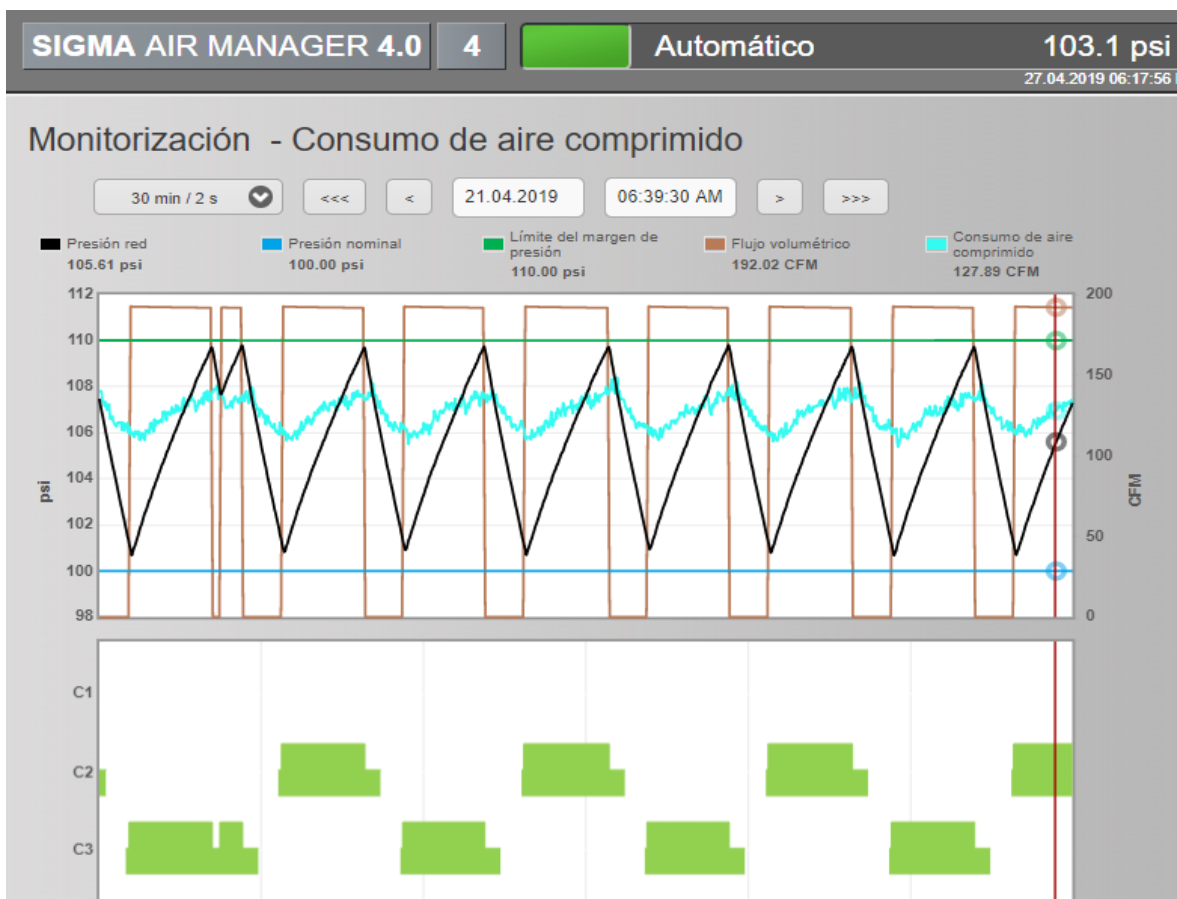


Figura 66. Gráfica de consumo de aire comprimido para determinar las pérdidas debido a fugas de la red de aire comprimido.

Fuente: Sigma Air Manager 4.0, Kaeser.

En la Figura 66 se muestra la gráfica de consumo de aire comprimido del domingo 21 de abril a las 6:40 a.m., este comportamiento se repitió los domingos 7, 14 y 28 de abril; finalmente se tiene un consumo por fugas de la red actual en promedio de $3,54 \text{ m}^3/\text{min}$ (125 cfm), para un 31% de la demanda promedio. En la Figura 67 se muestra el costo aproximado debido a las fugas del sistema y tiene un valor de \$11 300 tomando en cuenta un 3% por consumo energético del secador de aire.

Flujo Maximo (CFM)	150,00
Flujo Minimo (CFM)	100,00
Flujo promedio fugas (CFM)	125,00
kW/cfm	0,1850
kWh /dia	555

Costo Energético compresores				
	Kwh	Costo	total	
Punta	115,63	₡ 61,88	₡ 7 155	
Valle	208,13	₡ 30,94	₡ 6 439	
Nocturna	231,25	₡ 22,28	₡ 5 152	
	555,00		₡ 18 747	
Costo Energético secador de aire (3%)				
	Kwh	Costo	total	
Punta	3,47	₡ 61,88	₡ 215	
Valle	6,24	₡ 30,94	₡ 193	
Tipo de cambio	Nocturna	6,94	₡ 22,28	₡ 155
1/5/2019		16,65	Total	₡ 562
\$598,90	Total	571,65		
Costo total fugas (semanal)	₡ 135 162	Costo Energético anual de las fugas del sistema		₡ 6 758 118
Costo total fugas (semanal)	\$ 226	Costo Energético anual de las fugas del sistema		\$ 11 284

Figura 67. Costo estimado en pérdidas por fugas mediante el consumo mínimo de los domingos.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la inspección de fugas mediante ultrasonido a cargo de la empresa Tecnologías Predictivas S.A. y se determinaron 74 fugas para un flujo de aproximadamente 3,25 m³/min (114 cfm) que al año cuestan cerca de \$9 000. Esto representa un 30% del consumo promedio de la planta. Mediante la herramienta del gráfico de Pareto se agruparon las fugas más representativas, de las cuales 18 de ellas representan el 57% de las pérdidas, con un costo de aproximadamente \$5 000, en la Figura 69 se muestra el listado de fugas seleccionadas para ser reparadas por cada supervisor de planta con recursos internos del departamento.

Gráfico de Pareto

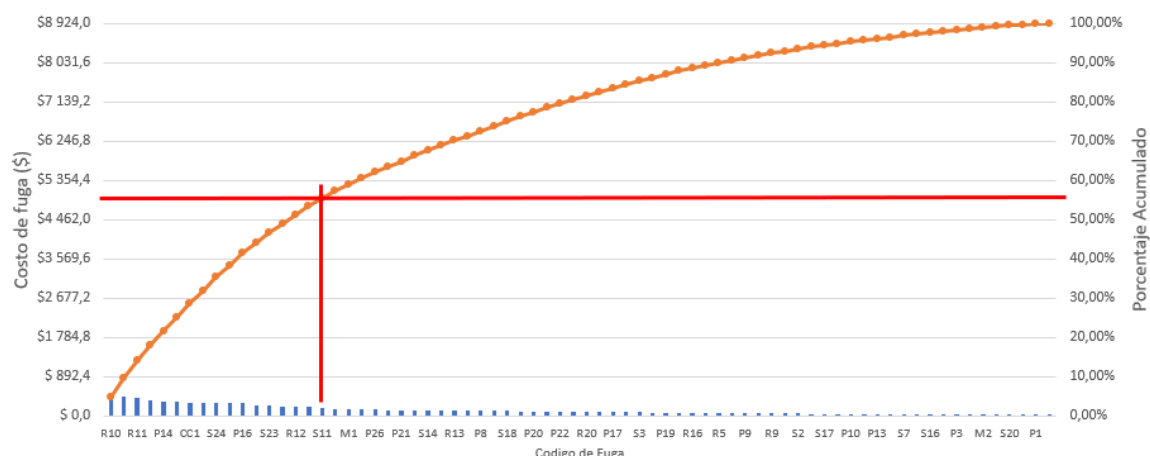


Figura 68. Gráfico de Pareto de las fugas detectadas en la red de aire comprimido.

Fuente: elaboración propia.

	Descripción	Área de planta	Código de fuga	Flujo de fuga (ft ³ /h)	Flujo de fuga (cfm)	Costo de fuga
1	Purga C3	Cuarto compresores	CC1	216,40	3,61	\$300
2	Separador aceite C1	Cuarto compresores	CC2	204,30	3,41	\$283
3	manguera hacia transfer	Primario	P14	232,70	3,88	\$323
4	Confinado evisceración, etiqueta fuga#6	Primario	P25	216,40	3,61	\$300
5	Estacion químicos #5, por referenciar	Primario	P16	204,30	3,41	\$283
6	Area de aceite(2do piso), manguera hacia cocinas vicerias	Rendering	R10	305,70	5,10	\$424
7	Blow tank plumas	Rendering	R18	305,70	5,10	\$424
8	Area de aceite(2do piso), panel neumático de cocinas vicerias	Rendering	R11	288,60	4,81	\$400
9	Válvula ciclón plumas	Rendering	R4	229,20	3,82	\$318
10	Panel neumático de silos	Rendering	R6	144,60	2,41	\$200
11	Area de aceite(2do piso), panel neumático de cocinas vicerias	Rendering	R12	144,60	2,41	\$200
12	Boge, etiqueta de fuga #3	Secundario	S9	257,20	4,29	\$356
13	Confinado cortes, etiqueta fugas #14	Secundario	S24	216,40	3,61	\$300
14	Confinado cortes, etiqueta fugas #2	Secundario	S12	162,20	2,70	\$225
15	Confinado cortes, etiqueta fugas #13	Secundario	S23	162,20	2,70	\$225
16	Válvula de chiller ubicada en el techo	Secundario	S1	144,60	2,41	\$200
17	Confinado cortes, etiqueta fugas #1	Secundario	S11	128,80	2,15	\$179
18	Confinado cortes, etiqueta fugas #11	Secundario	S21	114,80	1,91	\$159
Ahorro anual por reparar fugas						\$5 099

Figura 69. Listado de fugas que representan el 80% de las perdidas detectadas por fugas en la red.

Fuente: Tecnologías predictivas (2019).

Se toman los resultados obtenidos mediante la inspección de fugas como los datos más acertados de la red de aire comprimido y como ingresos para el estudio financiero.

4.2.9.5 Costo de oportunidad debido a paros de proceso

Este costo de oportunidad se asocia a la pérdida de producción debido a paros del proceso a causa de una falla en el sistema de aire comprimido. De acuerdo con el Departamento de producción y contabilidad, cada minuto de paro le cuesta a la empresa \$76, esto incluye los costos energéticos por electricidad y búnker, los salarios ordinarios, materia prima y otros gastos fijos.

Se tomaron los datos registrados de los últimos dos años fiscales, se subdividen los paros por áreas de la planta en primario, secundario y general cuando es una falla que afecta toda la planta. En el año fiscal 2018-2019 para el caso de primario se tienen registrados dos paros debido a aire comprimido, los cuales suman 110 minutos de paro.

Para el proceso secundario se tienen registros de cuatro fallos debido a faltante de aire comprimido, sin embargo, este proceso productivo cuenta con una ventana de 15 minutos antes de parar el proceso (se identifican con color rojo) y tuvieron una duración menor a ese tiempo, por lo tanto, no se afectó la producción y dos de esas fallas se produjeron por falta de fluido eléctrico.

El último paro se dio debido a la apertura de una válvula que comunica render con el resto de la planta, la cual quedó después de modificaciones en la red de aire comprimido, esto causó que el equipo Hopper no operara adecuadamente y provocó un paro de 4 minutos mientras se reestablecía el sistema. Estas son fallas que se originan debido a un diseño inadecuado de la red de aire comprimido.

Finalmente, se tiene un paro total del sistema, el cual afectó toda la planta, este se produjo por un daño en una válvula a la salida del secador de aire, la cual cumplió su vida útil y se quedó pegada en posición cerrada, esto provocó un paro de 91 minutos.

Fallas durante el 2018 y 2019 debido al Sistema de aire comprimido							
Fecha	Departamento	Equipo	Tipo de Falla	Dep Causa	Turno	Min	Descripción de Falla
1/5/2018	Primario	Planta general	Falla Mecánica	Mantenimiento	---	80,00	TNE pro problemas con aire comprimido en planta
1/10/2018	Primario	Planta general	Falla Mecánica	Mantenimiento	---	30,00	TNE por problemas de falta de aire en planta .
Total minutos Primario						110,00	
Fecha	Departamento	Equipo	Tipo de Falla	Dep Causa	Turno	Min	Descripción de Falla
19/10/2018	Gainco	Gainco	Falla Electrica	Mantenimiento	2	6,00	Falta de aire
05/12/2018	Gainco	Gainco	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	11,00	Falta de aire
29/12/2018	Gainco	Gainco	Falla Electrica	Mantenimiento	2	8,00	Falta de aire
07/01/2019	Gainco	Gainco	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	15,00	Falta de aire
22/4/2019	Secundario	Hopper	Falla mecanica	Mantenimiento	---	4,00	Falta de aire
Total minutos Secundario						4,00	
Fecha	Departamento	Equipo	Tipo de Falla	Dep Causa	Turno	Min	Descripción de Falla
29/4/2018	General	Secador de aire	Falla mecanica	Mantenimiento		91,00	Pérdida de presión de aire en sistema de planta
Total minutos Primario						91,00	
Minutos totales de paro					205,0		
Costo de oportunidad de paro por minuto					\$76,0		
Costo total debido a paros					\$15 580,0		

Figura 70. Afectación en el proceso debido al sistema de aire comprimido para el FY1819.

Fuente: elaboración propia.

En total, todos los paros suman 205 minutos, tomando el costo de producción proporcionado por el Departamento de producción y contabilidad de \$76/min, se tiene un costo total debido a paros de producción de \$15 580 para el año fiscal 2018-2019.

Fallas durante el 2017 y 2018 debido al Sistema de aire comprimido							
Fecha	Departa	Equipo	Tipo de Fa	Dep Causa	Turno	Min	Descripción de Falla
10/10/2017	Marinados	INYECTORA DE PIEZAS	Falla Mecanica	Mantenimiento	1	8,00	Falta de precion de aire
16/1/2018	Cortes	Módulo KFC	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	9,00	Falta de aire
3/11/2017	Cortes	Módulo KFC	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	10,00	Por falta de aire en planta
3/11/2017	Cortes	Clipiadora	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	10,00	Por falta de aire en planta
27/9/2017	Marinados	Detector de Metales	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	15,00	Falta de aire
19/12/2017	Cortes	Módulo KFC	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	15,00	Falta de aire
19/12/2017	Cortes	Módulo Physics	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	15,00	Falta de aire
11/9/2017	Cortes	Módulo KFC	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	20,00	Falta de aire
12/1/2018	Marinados	INYECTORA DE POLLO LIMP	Falla Electrica	Mantenimiento	2	20,00	Falta de aire
8/6/2017	Deshuese	FLOW LINE	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	25,00	Falta de aire
23/8/2017	Marinados	INYECTORA DE PIEZAS	Falla de Mecanica	Mantenimiento	1	35,00	Mangueras de aire
3/10/2017	Marinados	INYECTORA DE PIEZAS	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	45,00	Banda mal desmontada y presión de aire
19/12/2017	Marinados	INYECTORA DE PIEZAS	Falla Mecanica	Mantenimiento	2	70,00	Falta de aire
Total min						215,00	
Minutos totales de paro					215		
Costo de oportunidad de paro por minuto					\$76		
Costo total debido a paros					\$16 340		

Figura 71. Afectación en el proceso debido al sistema de aire comprimido para el FY1718.

Fuente: elaboración propia.

Para el año fiscal 2017-2018 únicamente se cuenta con los datos de paros ocurridos en proceso secundario, sin embargo, estos tienen un costo de oportunidad de \$16 340. Por lo tanto, durante los últimos dos años fiscales se tuvo un comportamiento similar en cuanto a paros debido al sistema de aire comprimido. Otro dato rescatable del registro de fallos es que en su mayoría corresponden a falta de aire o falta de presión, debido a las descargas del *blow tank*, caída de presión

debido a la saturación de las tuberías o a la falta de volumen en el tanque de almacenamiento para compensar los picos de demanda.

4.2.9.6 Costo aproximado debido a la pérdida de presión en la red.

Como se determinó a partir del valor teórico de que por cada bar de aumento de presión el consumo de energía aumenta en un 6%, debido a la pérdida de presión se tiene un consumo de 2,34% de más en energía eléctrica. Dado que en promedio se tiene un consumo de energía de 9742 durante las semanas de análisis que van desde el 31 de marzo hasta el 28 de abril, el consumo de energía aproximado por las pérdidas de presión es de 223 kWh para un costo anual de \$673, como se muestra en la Figura 72.

Costo Energético debido a la caída de presión				
	Kwh	Costo	total	
Punta	46,44	¢ 61,88	¢ 2 874	
Valle	83,60	¢ 30,94	¢ 2 587	
Nocturna	92,89	¢ 22,28	¢ 2 070	
	222,93		¢ 7 530	
Costo Energético secador de aire (3%)				
	Kwh	Costo	total	
Punta	1,39	¢ 61,88	¢ 86	
Valle	2,51	¢ 30,94	¢ 78	
Nocturna	2,79	¢ 22,28	¢ 62	
Tipo de cambio				
1/5/2019		6,69	Total	¢ 226
\$598,90	Total	229,62		
Costo total (semanal)		¢ 7 756	Costo Energético anual	¢ 403 309
Costo total (semanal)		\$ 13	Costo Energético anual	\$ 673

Figura 72. Costo estimado debido a la pérdida de presión en la red.

Fuente: elaboración propia.

4.2.9.7 Ahorro de energía al reducir la demanda artificial

Al inicio del periodo de medición, los parámetros de presión establecidos eran una presión mínima de 110 psi y una máxima de 125 psi. Con la evaluación y el levantamiento de equipos se determinó que la presión del sistema debe ser de 90 psi, ya que del listado de equipos esta corresponde al mayor valor requerido, se toman en cuenta los 6 psi debido a pérdidas de carga determinadas y se reduce la

banda de presión a 96 psi el valor inferior y a 110 psi el valor superior, esto corresponde a una disminución de 14 psi en la banda de presiones.

Realizando el cálculo del ahorro estimado a partir del valor teórico, se obtienen ahorros en energía de hasta \$1 591 al año y de 2 toneladas de dióxido de carbono, como se muestra en la figura 73.

Costo Energético debido a la caída de presión			
	Kwh	Costo	total
Punta	109,71	¢ 61,88	¢ 6 789
Valle	197,47	¢ 30,94	¢ 6 110
Nocturna	219,41	¢ 22,28	¢ 4 889
	526,59		¢ 17 787
Costo Energético secador de aire (3%)			
	Kwh	Costo	total
Punta	3,29	¢ 61,88	¢ 204
Valle	5,92	¢ 30,94	¢ 183
Nocturna	6,58	¢ 22,28	¢ 147
Tipo de cambio			
1/5/2019	15,80	Total	¢ 534
\$598,90	Total	542,39	
Costo total fugas (semanal)	¢ 18 321	Costo Energético anual de las fugas del sistema	¢ 952 674
Costo total fugas (semanal)	\$ 31	Costo Energético anual de las fugas del sistema	\$ 1 591

Figura 73. Costo estimado debido a la demanda artificial de aire comprimido.

Fuente: elaboración propia.

4.2.9.8 Resumen

A modo de resumen, se muestra la tabla 5 de costos debido a pérdidas detectadas en el sistema de aire comprimido.

Tabla 5. Resumen de costos asociados a deficiencias en la red de aire comprimido.

Rubro	Monto
Descarga Blow Tank	\$570
Afectación por condensados	\$1 620
Costo debido al uso en tamiz de harina	\$1 856 – \$3 700
Costo debido a fugas	\$ 9 000
Costo de oportunidad debido a paros	\$15 580
Costo debido a pérdida de presión	\$673
Costo debido a la demanda artificial	\$1 591
Total	\$30 894 - \$32 734

Como se muestra en la Tabla 5, se tiene un monto total de aproximadamente \$30 000, al tomar acciones y corregir estas deficiencias detectadas, es posible aumentar la eficiencia del sistema de aire comprimido y mejorar presupuesto de mantenimiento, así como evitar las afectaciones del proceso productivo.

Con respecto a la huella de carbono, se evitaría enviar cerca de 19,44 toneladas de dióxido de carbono al ambiente. Esta reducción de dióxido de carbono es equivalente a tener 6500 m² sembrados de árboles de eucalipto.

Tabla 6. Reducción en la huella de carbono al corregir las ineficiencias del sistema de aire comprimido actual.

Rubro	TonCO2
Descarga Blow Tank	0,64
Eliminación del tamiz de harina	2,66
Debido a fugas	13,36
Debido a pérdida de presión	0,84
Debido a la demanda artificial	2,00
Reducción total de la huella de carbono	19,44
Terreno sembrado de eucalipto	6500 m ²



**Capítulo 5. Rediseño de la red de aire
comprimido**

5.1 Consideraciones iniciales

5.1.1 Equipos de generación

Se dispone de los equipos de generación de aire comprimido que actualmente se encuentran en la planta, incluyendo el sistema de tratamiento de aire (Secador de aire y filtrado).

5.1.2 Material de la tubería y tipos de soportes

El material de la tubería será aluminio color azul, ya que es de fácil instalación, bajo coeficiente de fricción, baja caída de presión y teóricamente presenta 0% de fugas. Además, la empresa y la gerencia desean continuar con este tipo de material, ya que se inició con el cambio de hierro galvanizado a tubería de aluminio cuando se rediseñó el cuarto de compresores.

Existen proveedores en Costa Rica que distribuyen y construyen redes de aire comprimido con este tipo de material, por ejemplo: Grupo Flotec, Facility Supply, Kaeser, Enesa, entre otras.

El sistema de soportes, anclajes y accesorios será el dispuesto por la casa matriz de la tubería, un ejemplo es el de la tubería Prevost, cuyo distribuidor en Costa Rica es Grupo Flotec, en la Figura 74 se muestra un extracto del catálogo brindado por dicha empresa.



Figura 74. Muestra del tipo de soportes para la tubería PREVOST, Grupo Flotec.

Fuente: PREVOST (2019).

5.2 Consumo de aire comprimido de diseño

La demanda de aire comprimido de diseño debe contemplar el 0% de pérdidas por fugas para tubería de aluminio y también debe tomarse en cuenta una posible ampliación de la planta, se proyecta un crecimiento de alrededor de un 20%. Por lo tanto, el flujo de diseño será el consumo actual de los equipos considerando un 20% de más. En cuanto a los equipos de generación, en caso de ser necesario, se realizará la adquisición de los equipos requeridos para suplir la nueva demanda en el momento que se realice la ampliación de la planta.

La demanda de aire comprimido de subdividió en tres secciones de la planta: primario, secundario y *rendering*.

5.2.1 Demanda de aire comprimido de primario

La demanda de aire comprimido de primario es de 5,4 m³/min (191 cfm), aplicando el factor de ampliación se obtiene un flujo de 6,5 m³/min (229 cfm), como se muestra en la Figura 75.

Primario					
Código	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Caudal		
			Consumo de aire (m ³ /min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)
P1	Intercambiador 1	7	0,12035	4,2500	2,0060
P1	Intercambiador 2	7	0,12035	4,2500	2,0060
P2	Escaldadora de patas	7	0,00033	0,0115	0,0054
P1	Deep tank	7	0,12035	4,2500	2,0060
P3	Trasnfer	7	0,00013	0,0046	0,0022
P4	Bomba de sangre	7	1,06188	37,5001	17,7001
P5	Bomba de molleja	7	0,42475	15,0000	7,0800
P6	Bomba de pescuezo	7	0,42475	15,0000	7,0800
P7	Bomba de hígado	7	0,42475	15,0000	7,0800
P8	Tensor línea de vicerado	7	0,00011	0,0040	0,0019
P9	Divisor de mollejas	7	0,00115	0,0407	0,0192
P10	Pistola para dedos	7	0,00147	0,0519	0,0245
P11-P21	Estación de químicos (cant 10)	7	1,50787	53,2502	25,1341
P22	Sistema centralizado	7	1,18931	42,0001	19,8241
Total			5,39756	190,61321	89,96943
Total con 20% de ampliación			6,47707	228,73585	107,96332

Figura 75. Demanda de diseño para el área de primario.

Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Demanda de aire comprimido de secundario

La demanda de aire comprimido de secundario es de 5,6 m³/min (196 cfm), aplicando el factor de ampliación se obtiene un flujo de 6,7 m³/min (235 cfm), como se muestra en la Figura 76.

Secundario					
Código	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Caudal		
			Consumo de aire (m ³ /min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)
S1	Hopper	7	0,0272	0,9606	0,4534
S2	Banda (ácido peracético)	7	0,0034	0,1191	0,0562
S3-S8	Clipadora	7	0,1210	4,2717	2,0162
S9-S14	Estación de químicos (Cant 6)	7	1,0194	36,0001	16,9920
S15	Gianco	7	0,1189	4,2000	1,9824
S16	Inyectora Multijector 700	7	0,2500	8,8278	4,1667
S17	Detector de metales	7	0,2124	7,5000	3,5400
S18	Detector de metales KFC	7	0,2124	7,5000	3,5400
S19	Compact	7	1,2743	45,0001	21,2401
S20	Banda Seleccionadora KFC	7	0,2124	7,5000	3,5400
S21	Flowline salida 1	7	0,1500	5,2972	2,5003
S22	Flowline salida 2	7	0,1500	5,2972	2,5003
S23	Flowline salida 3	7	0,0750	2,6486	1,2501
S24	Physics (se contempla por backup)	7	1,6990	60,0002	28,3201
Total			5,5253	195,1226	92,0979
Total con 20% de ampliación			6,63030	234,14713	110,51745

Figura 76. Demanda de diseño para el área de secundario.

Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Demanda de aire comprimido de rendering

En el caso de *rendering*, el *blow tank* cuenta con una tubería independiente, por lo que no suma para el cálculo de la demanda y dado que se determinó que el uso del tamiz de harina era inapropiado, se eliminó este equipo de la red, por lo tanto, el flujo de aire comprimido de *rendering* se redujo, ahora corresponde a 0,7 m³/min (23 cfm), aplicando el factor de ampliación se obtiene un flujo de 0,8 m³/min (27 cfm), como se muestra en la Figura 77.

Rendering					
Código	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Caudal		
			Consumo de aire (m ³ /min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)
R1	Ciclón Carnicos	7	0,0009	0,0309	0,0146
R3	Silos Carnicos	7	0,0040	0,1425	0,0672
R4	COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (carga)	7	0,0054	0,1892	0,0893
R5-R6	COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (descarga)	7	0,0065	0,2309	0,1090
-	Blow tank víceras	7	3,8992	137,7004	64,9946
R7	Blow tank víceras (cuchillas)	7	0,0005	0,0185	0,0087
R7	Válvula de diafragma	7	0,0028	0,1000	0,0472
R1	Ciclón plumas	7	0,0001	0,0031	0,0015
R3	Silos plumas	7	0,0040	0,1425	0,0672
R4	COOKER DE HARINA-PLUMAS (carga)	7	0,0054	0,1892	0,0893
R8	COOKER DE HARINA-PLUMAS (descarga)	7	0,0108	0,3815	0,1801
R7	Blow tank plumas (cuchillas)	7	0,000986201	0,0348	0,0164
R9-R12	Estación de químicos (cant 4)	7	0,5946549	21,0001	9,9120
Total			4,5353	160,1635	75,5972
Total sin blow tank			0,6361	22,4631	10,6026
Total con 20% de ampliación			0,76330	26,95572	12,72310

Figura 77. Demanda de diseño para el área de rendering.

Fuente: elaboración propia.

5.2.4 Demanda de aire comprimido total de la planta

Como se describió en el marco teórico, el consumo de aire comprimido total es la suma de los consumos de cada uno de los equipos por el factor de ampliación y el factor multiplicador. En este caso, se determinó que con un 20% de ampliaciones futuras el equipo de generación actual no tiene la capacidad para suplir la demanda proyectada, por lo tanto, cuando se realicen las ampliaciones se tendrá que realizar la compra o traslado de equipos de generación.

Para la demanda actual que tiene la planta, el equipo de generación es capaz de suplirla, ya que el conjunto de los tres compresores tiene una capacidad de 726 cfm en total, por lo que satisfacen los 703 cfm de consumo de aire comprimido de la planta a las condiciones ambientales de la zona.

Cuadro Resumen		
Area de planta	Consumo de aire calculado (m ³ /min)	Consumo de aire calculado (cfm)
Primario	5,3976	190,6127
Secundario	5,5253	195,1221
Rendering	4,5353	160,1630
Total aire planta	15,4581	545,8978
Considerando un 20% de ampliaciones	13,8707	655,0773
Demanda total con ampliaciones y Factor multiplicador	17,8654	843,7396
Demanda para selección del compresor sin factor de ampliaciones	19,9101	703,1163

Figura 78. Demanda de aire comprimido total de la planta y validación de la capacidad instalada de generación de aire comprimido.

Fuente: elaboración propia.

5.3 Diseño de los bajantes de los equipos

El diseño de los bajantes de tubería hacia los equipos consumidores de aire comprimido se ha estandarizado, de forma que, cada vez que se ingrese un equipo a la planta y requiera aire comprimido, se cumpla con este estándar. La finalidad es tener un *stock* de repuestos mínimo y estándar, minimizar la posibilidad de generar una fuga, evitar el uso de mangueras y acoples inapropiados. Asegurarse de que no lleguen condensados a los equipos, se cumpla con la lubricación y el filtrado requerido por el usuario final, además, evitar una caída de presión excesiva entre el equipo y la red.

Como se definió anteriormente, el bajante es la conexión entre la tubería de distribución y el equipo, generalmente termina en una unión flexible tipo maguera. Como estándar se tiene que un bajante debe cumplir con:

1. Conexión tipo cuello de ganso a la tubería de distribución.
2. Llave de globo para aplicaciones neumáticas.
3. Unidad de mantenimiento compuesta por regulador de presión, manómetro, lubricador y filtro.
4. La conexión al equipo debe ser manguera flexible para aplicaciones neumáticas de diámetro adecuado al flujo de aire comprimido del usuario.



Figura 79. Ejemplo del estándar requerido de bajantes en la planta PIPASA SR.

Fuente: (PREVOST, 2019).

5.3.1 Diámetro de la tubería de los bajantes

Con el fin de determinar el diámetro adecuado para cada uno de los bajantes de los equipos, se toma el consumo de aire comprimido determinado en el capítulo 4. Se utilizaron dos métodos de cálculo, uno de ellos es el uso de la Ecuación 5 y el otro método el uso del *software* Tranzar Flow Calculator del fabricante Parker & Legris.

A modo de ejemplo, se realiza el cálculo mediante la Ecuación 5 y el *software* del bajante hacia la bomba de sangre ubicada en primario.

Tabla 7. Datos para el cálculo del bajantes hacia la bomba de sangre.

Equipo	Bomba de sangre
Presión	7 bar
Consumo de aire comprimido	1,4158 m ³ /min; 50 cfm; 23,6 l/s
Longitud equivalente aproximada	7 m
Caída de presión admisible	0,02 bar

$$d = \sqrt[5]{\frac{(450 * q_c^{1,85} * L_{eq})}{(\Delta P * P)}}$$

$$d = \sqrt[5]{\frac{(450 * (23,6 \frac{l}{s})^{1,85} * 7 m)}{(0,02 * (7 bar + 1 bar))}}$$

$$d = 23,27 mm$$

Se sustituyen los valores en la Ecuación 5 con los valores de la tubería que se desea determinar, en este caso el diámetro interior adecuado es de 23,27 mm, por lo tanto, el diámetro estándar inmediatamente mayor es de 25mm.

Utilizando el *software* de Parker, se ingresan los mismos valores y se debe seleccionar tubería de aluminio y tramo recto. El *software* devuelve el valor de diámetro recomendado, el caudal máximo, la velocidad del gas y la pérdida de carga. En la Figura 80 se muestra la pantalla del *software* y los valores de entrada y salida. Como se puede observar, el diámetro recomendado por el *software* es de 25mm.

En ambos casos se coincide con el diámetro de la tubería para el bajante de la bomba de sangre.

Figura 80. Ejemplo de cálculo del diámetro adecuado para la bomba de sangre mediante el software.

Fuente: Transair Flow Calculator (2019).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diámetros de los bajantes de los equipos de primario (Figura 81), secundario (Figura 82) y rendering (Figura 83).

Código de bajante	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Primario			Tubería				
			Caudal			Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro interno adecuado (mm)	Diámetro estándar (mm)	Parker-legris (mm)
			Consumo de aire (m3/min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)					
P1	Intercambiador 1	7	0,14158	5,0000	2,3600	6	0,02	10	16	16,5
P1	Intercambiador 2	7	0,14158	5,0000	2,3600	6	0,02	10	16	16,5
P2	Escaldadora de patas	7	0,00038	0,0136	0,0064	10	0,02	1	16	16,5
P1	Deep tank	7	0,14158	5,0000	2,3600	6	0,02	10	16	16,5
P3	Transfer	7	0,00015	0,0054	0,0025	10	0,02	1	16	16,5
P4	Bomba de sangre	7	1,41585	50,0001	23,6001	7	0,02	23	25	25
P5	Bomba de molleja	7	0,56634	20,0001	9,4400	6	0,02	16	25	25
P6	Bomba de pescuezo	7	0,56634	20,0001	9,4400	12	0,02	18	25	25
P7	Bomba de hígado	7	0,56634	20,0001	9,4400	15	0,02	19	25	25
P8	Tensor línea de vicerado	7	0,00015	0,0054	0,0025	8	0,02	1	16	16,5
P9	Divisor de mollejas	7	0,00154	0,0542	0,0256	10	0,02	2	16	16,5
P10	Pistola para dedos	7	0,01469	0,5187	0,2448	25	0,02	6	16	16,5
P11-P21	Estación de químicos	7	0,28317	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5
P22	Sistema centralizado	7	0,56634	20,0001	9,4400	8	0,02	17	25	25

Figura 81. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de primario.

Fuente: elaboración propia.

Código de bajante	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Caudal			Tubería				
			Consumo de aire (m ³ /min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)	Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro interno adecuado (mm)	Diámetro estándar (mm)	Parker-legris (mm)
S1	Hopper	7	0,0544	1,9211	0,9068	15	0,02	8	16	16,5
S2	Banda (ácido peracético)	7	0,0337	1,1905	0,5619	5	0,02	5	16	16,5
S3-S8	Clipadora	7	0,0420	1,4832	0,7001	18	0,02	8	16	16,5
S9-S14	Estación de químicos	7	0,2832	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5
S15	Gianco	7	0,1586	5,6000	2,6432	5	0,02	10	16	16,5
S16	Inyectora Multijector 700	7	0,3333	11,7704	5,5556	10	0,02	15	16	16,5
S17	Detector de metales	7	0,2832	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5
S18	Detector de metales KFC	7	0,2832	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5
S19	Compact	7	1,6990	60,0002	28,3201	10	0,02	27	32	40
S20	Banda Seleccionadora KFC	7	0,2832	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5
S21	Flowline salida 1	7	0,2000	7,0630	3,3337	10	0,02	12	16	16,5
S22	Flowline salida 2	7	0,2000	7,0630	3,3337	10	0,02	12	16	16,5
S23	Flowline salida 3	7	0,1000	3,5315	1,6669	10	0,02	9	16	16,5
S24	Physics (se contempla por backup)	7	1,6990	60,0002	28,3201	5	0,02	23	32	40

Figura 82. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de secundario.

Fuente: elaboración propia.

Código de bajante	Equipo/ herramienta	Presión (bar)	Caudal			Tubería				
			Consumo de aire (m ³ /min)	Consumo de aire (cfm)	(l/s)	Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro interno adecuado (mm)	Diámetro estándar (mm)	Parker-legris (mm)
R1	Ciclón Carnicos	7	0,0009	0,0309	0,0146	10	0,02	2	16	16,5
R3	Silos Carnicos	7	0,0036	0,1263	0,0596	10	0,02	3	16	16,5
R4	COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (carga)	7	0,0026	0,0917	0,0433	10	0,02	2	16	16,5
R5-R6	COOKER DE HARINA-CÁRNICOS (descarga)	7	0,0032	0,1119	0,0528	10	0,02	3	16	16,5
R7	Blow tank víceras (cuchillas)	7	0,0009	0,0309	0,0146	10	0,02	2	16	16,5
R7	Válvula de diafragma	7	0,0028	0,1000	0,0472	10	0,02	3	16	16,5
R1	Ciclón plumas	7	0,0009	0,0309	0,0146	10	0,02	2	16	16,5
R3	Silos plumas	7	0,0036	0,1263	0,0596	10	0,02	3	16	16,5
R4	COOKER DE HARINA-PLUMAS (carga)	7	0,0026	0,0917	0,0433	10	0,02	2	16	16,5
R8	COOKER DE HARINA-PLUMAS (descarga)	7	0,0052	0,1848	0,0872	10	0,02	3	16	16,5
R7	Blow tank plumas (cuchillas)	7	0,000874291	0,0309	0,0146	10	0,02	2	16	16,5
R9-R12	Estación de químicos	7	0,283169	10,0000	4,7200	10	0,02	14	16	16,5

Figura 83. Diámetros de tubería para cada uno de los bajantes de los equipos de rendering.

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que la mayoría de los bajantes son de un diámetro de 16mm, en primario solo 5 bajantes son de 25mm, en secundario solo 2 bajantes son de 40mm y en el caso de *rendering* todos los bajantes son de 16mm de diámetro.

5.4 Diseño de la tubería principal y anillos

Se plantean dos diseños de la red de aire comprimido en forma de anillo o cerrada, ambos diseños contemplan las tres áreas en que se encuentra dividida la planta: primario, secundario y *rendering*. Además de un 20% como factor de ampliaciones, este dato fue suministrado por la gerencia de mantenimiento.

5.4.1 Diseño de anillos A

Este diseño consiste en tres anillos independientes, uno por cada área de la planta, cada uno cuenta con una conexión individual en el *manifold* del cuarto de compresores, lo cual permite, en caso de ser necesario, aislar un anillo sin afectar los demás. Se busca con cada anillo recorrer la parte externa de la planta, sin embargo, existen tramos donde es inevitable recorrer los confinados y techos de la planta.

Para determinar el diámetro del tramo de tubería desde el cuarto de compresores hasta el anillo y diámetro del anillo, se tomó el consumo probable de los equipos más el 20% de ampliaciones. En la sección 5.2, se determinó el flujo de aire comprimido para cada sección de la planta. Además, mediante los planos de la planta, se estimó la longitud de la tubería más un 15% por accesorios y por cambios de altura. Nuevamente se hizo uso de la Ecuación 5 y el *software* de Parker.

Para el sector de primario se determinó que se requiere un tramo de tubería lineal desde el cuarto de compresores hasta el anillo de 63mm y un anillo de 50mm de diámetro, como se muestra en la Figura 84. De acuerdo con datos del *software* Transair Flow Calculator, se puede ampliar el flujo de aire comprimido hasta 6,995 m³/min (247 cfm). En la Figura 85 se muestra un extracto del plano correspondiente a este anillo, se puede observar que el anillo recorre el exterior del área de primario, tiene una tubería intermedia que permite alimentar los equipos ubicados en el centro de esta sección.

		Caudal			Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro (mm)		
		(m ³ /min)	(cfm)	(l/s)			interno adecuado	estandar	Parker-legris
Anillo P	7	6,47707	228,73585	107,96332	160	0,05	64	63	50
Tramo hasta el anillo P	7	6,47707	228,73585	107,96332	50	0,03	56	50	63

Figura 84. Diámetro de las tuberías del anillo P y el tramo hasta el cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia

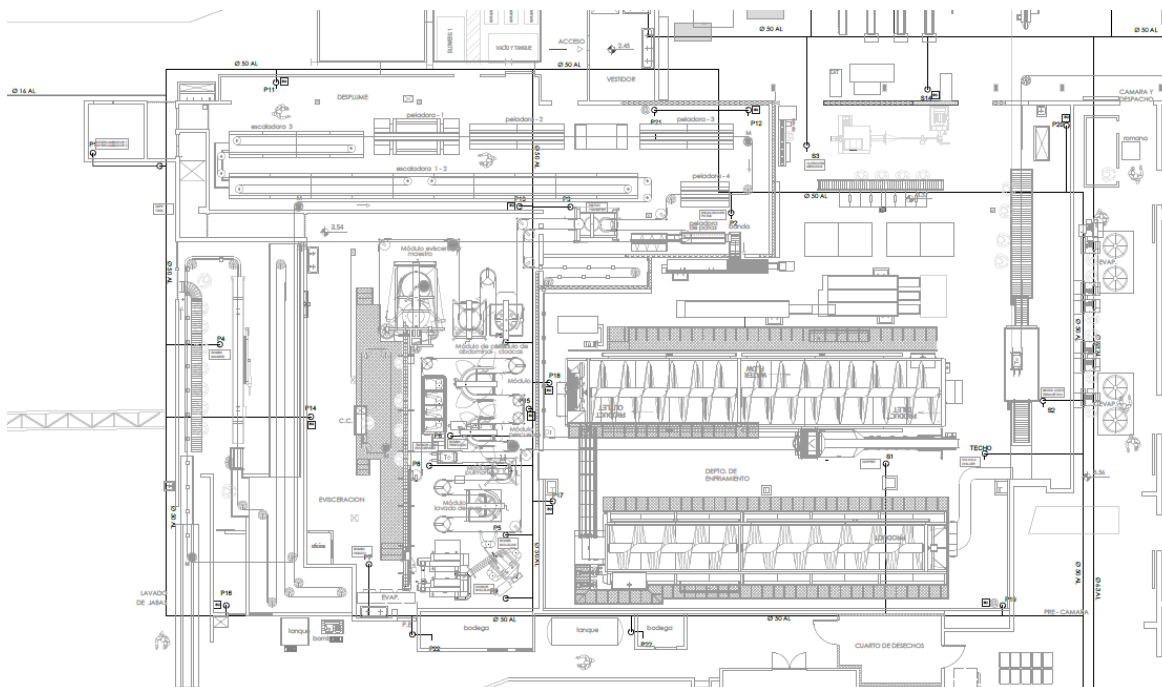


Figura 85. Muestra del plano correspondiente al anillo de primario del diseño A.

Fuente: elaboración propia

El anillo de secundario debe ser de una tubería de 50 mm y el tramo desde el cuarto de compresores con un diámetro de 63 mm. Este diseño tiene capacidad para un flujo de hasta 6,995 m³/min (247 cfm). En la Figura 87 se muestra un extracto del plano correspondiente a este anillo, en el cual se aprecia que recorre la parte externa del recinto, sin embargo, en la sección sur del anillo se debe ingresar al espacio confinado ubicado en el techo de la cámara de refrigeración. Este anillo también cuenta con una interconexión que distribuye el aire comprimido a los equipos ubicados en el medio de la planta, esta tubería también recorre el confinado sobre el área de cortes.

		Caudal			Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro (mm)		
		(m ³ /min)	(cfm)	(l/s)			interno adecuado	estandar	Parker-legris
Anillo S	7	6,63030	234,14713	110,51745	140	0,05	62	63	50
Tramo hasta el anillo S	7	6,63030	234,14713	110,51745	70	0,03	60	63	63

Figura 86. Diámetro de las tuberías del anillo S y el tramo hasta el cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

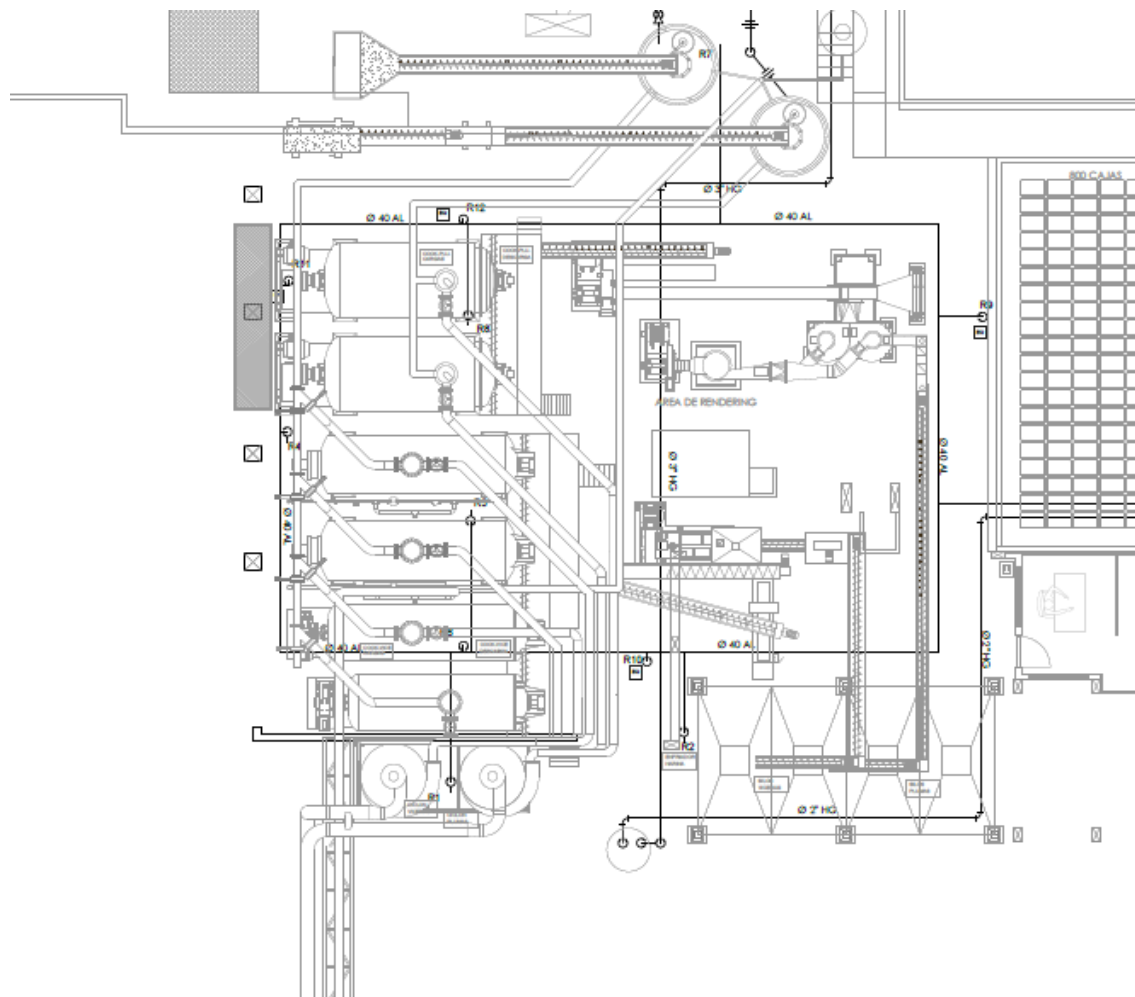


Figura 89. Muestra del plano correspondiente al anillo de *rendering* del diseño A.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2 Diseño de anillos B

Este diseño contempla dos anillos independientes que rodean las secciones de la planta: primario-secundario y *rendering*. En este caso, la variante con el diseño A en la fusión de los anillos P y S en uno solo que recorra el total de la planta con capacidad de transportar el flujo de ambas áreas, eliminando la tubería que va del cuarto de compresores al anillo de secundario.

El del anillo y el tramo desde el cuarto de compresores aumentaría a un diámetro de 76 mm con capacidad máxima de 16.1424 m³/min (570 cfm), para un factor final de ampliación de hasta 32%.

		Caudal			Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro (mm)		
		(m3/min)	(cfm)	(l/s)			interno adecuado	estandar	Parker-legris
Anillo P y S juntos	7	13,10737	462,88298	218,48077	240	0,05	90	100	76
Tramo hasta el anillos P y S	7	13,10737	462,88298	218,48077	40	0,03	69	80	76

Figura 90. Diámetro de las tuberías del diseño B y el tramo hasta el cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

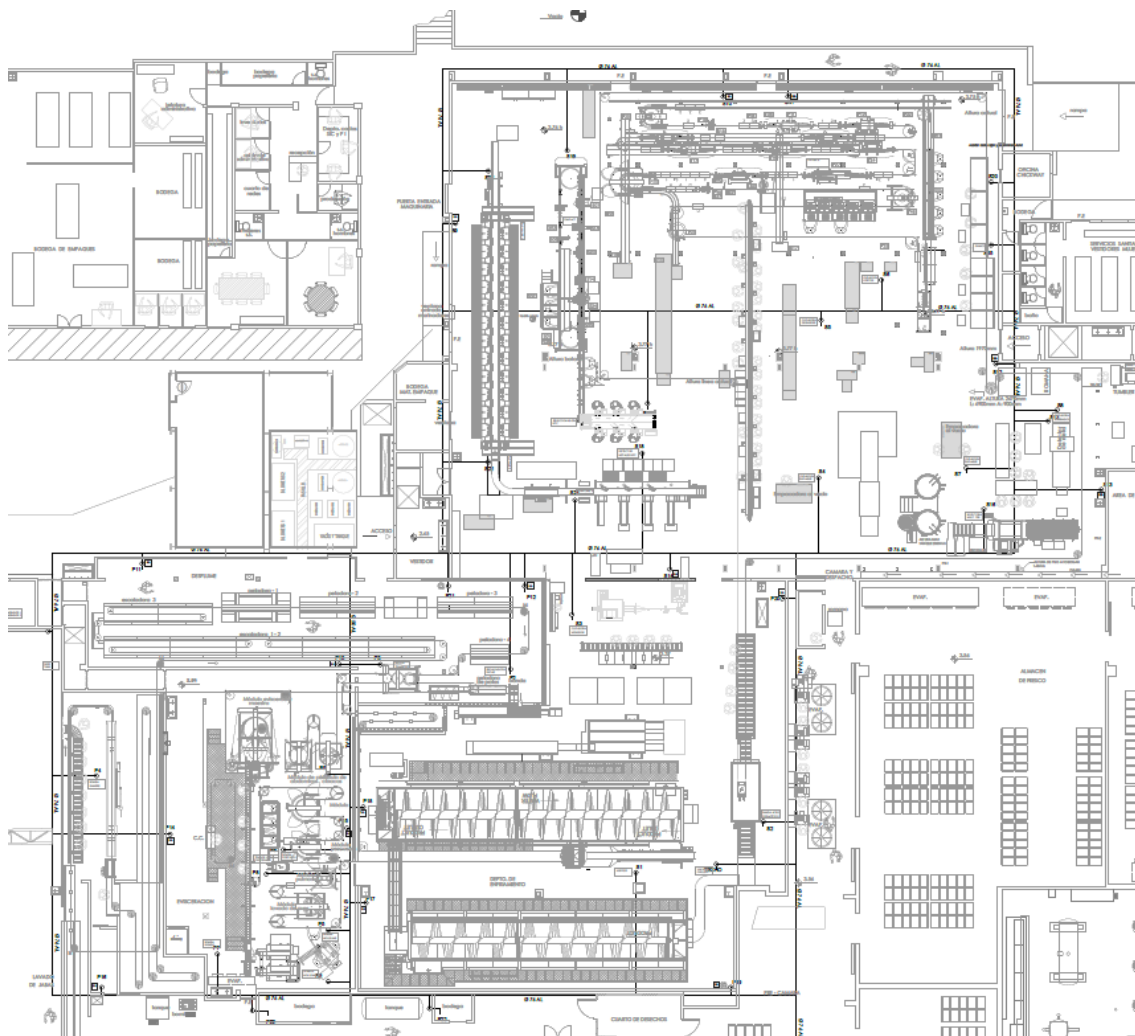


Figura 91. Muestra del plano correspondiente al diseño B.

Fuente: elaboración propia.

5.4.3 Manifold del cuarto de compresores

Se diseñó un *manifold* en el cuarto de compresores, el cual permita una conexión centralizada de las tuberías de aire comprimido, de tal forma que cada sector de la planta se encuentre separado del resto. Esto para permitir que se dé mantenimiento o realizar trabajos en una sección sin detener el suministro en las demás áreas. También se diseñó a una altura del piso que permita que personal

autorizado manipule las válvulas, en caso de requerirse, sin necesitar equipo de alturas, ya que actualmente se encuentran a una altura de aproximadamente 4 metros, por normas de seguridad se requiere un permiso de alturas, equipo de protección personal y más asociados que colaboren en el sitio.

En la Figura 92 se muestra la vista de cómo se distribuirán las tuberías en dicho cuarto. En el *manifold* se dejarán dos previstas para futuras ampliaciones que requiera la planta y se realiza la conexión de las tuberías hacia:

- *Blow tank* vísceras (tubería de hierro galvanizado actual)
- Anillo de primario
- Anillo de secundario
- Anillo de *rendering*

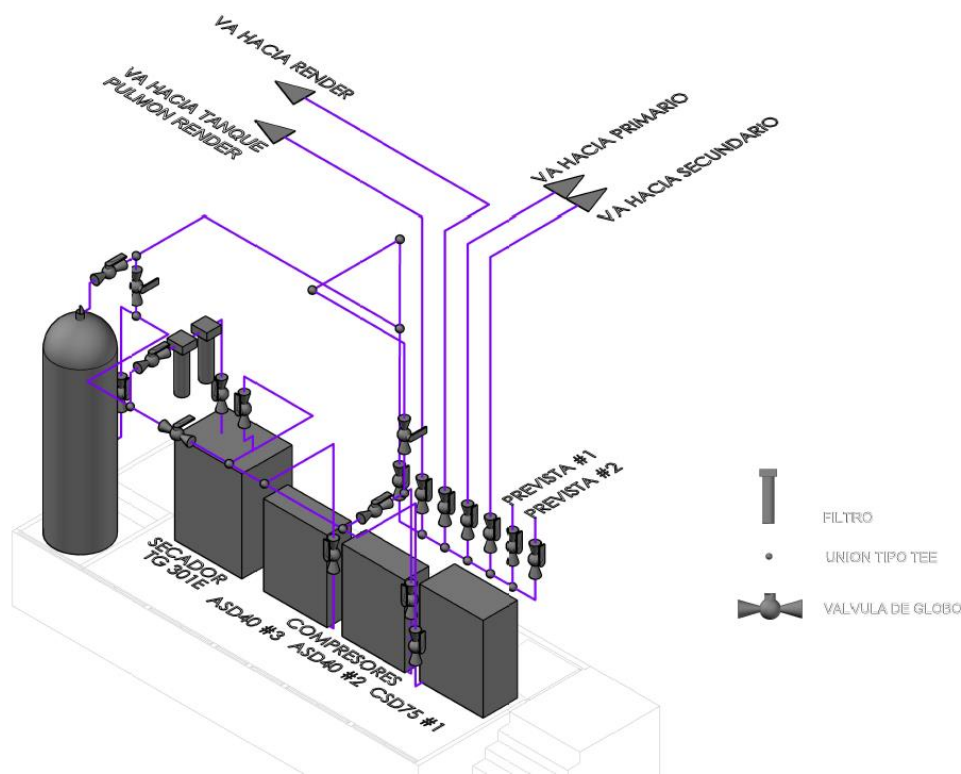


Figura 92. Vista isométrica del manifold del cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

		Caudal			Long. Equi. (m)	caída de presión admitida	Diámetro (mm)		
		(m ³ /min)	(cfm)	(l/s)			interno adecuado	estandar	Parker-legris
Manifold Cuarto Compresores	7	18,5498	655,0792	309,1974	15	0,03	65	80	76

Figura 93. Diámetro del manifold del cuarto de compresores.

Fuente: elaboración propia.

5.5 Cálculo del volumen del tanque pulmón

El volumen del tanque pulmón necesario para responder a los aumentos instantáneos en la demanda de aire comprimido de la planta debe cumplir con un volumen según Sullair de 2904 galones (10,98 m³). Se determinó mediante la herramienta de cálculo de Kaeser el volumen necesario del tanque de almacenamiento y como se muestra en la Figura 94, este debe ser de al menos 2474 galones (9,36 m³).

Tomando en cuenta los dos tanques instalados se tiene un volumen total de 6,78 m³, por lo que es necesario un tanque con un volumen de al menos 3 m³ para cumplir con un diseño adecuado.

Dimensionamiento del Tanque de Almacenamiento de Aire

¡Por favor, use punto en lugar de coma para indicar los decimales!
Los campos de texto azul muestran resultados.

Unidades SI
 Unidades US

Calcular como tanque de almacenamiento
 Calcular de acuerdo a la frecuencia mínima de conexión permitida

Caudal del compresor secuenciado de mayor tamaño *	V ₁	726	cfm
Caudal requerido en carga pico	V ₂	450	cfm
Presión máxima de corte	P _{max}	110	psig
Presión mínima de conexión	P _{min}	100	psig
Frecuencia mínima de conexión permitida**	Z	45	1/h
Factor de carga:***	A	61.983	%
V ₂ : V ₁		0.61983471074	
Volumen del tanque de almacenamiento	V _R	2474.24	gallon

Figura 94. Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento mediante la herramienta online de Kaeser.

Fuente: Kaeser Compressors (s.f.)

5.6 Tratamiento de los condensados del cuarto de compresores

Los secadores refrigerativos remueven cerca del 80% del agua presente en el aire, junto con esa agua condensada va emulsionado aceite de lubricación del compresor, por lo tanto, no se puede disponer al alcantarillado sanitario. Debe tratarse antes para separar el agua del aceite y asegurarse una concentración menor a 50mg/L (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], 2007), que el agua servida no vaya a contaminar los afluentes. Para lograrlo, Kaeser Costa Rica ofrece en su cartera de productos el AQUAMAT. Este equipo permite tratar los condensados y preparar el agua para al final disponerla a las demás aguas servidas.



Figura 95. Equipo de tratamiento de condensados AQUAMAT.

Fuente: KAESER Compressors (s.f.).

La selección de este equipo depende de la ubicación geográfica de la planta y el flujo de aire comprimido. Se seleccionará al flujo máximo que pueden entregar los compresores, el cual es de 20 m³/min (726 cfm), en la Figura 96 se muestran las especificaciones técnicas para la selección del AQUAMAT, en este caso se debe seleccionar para compresores de tornillo refrigerados por aceite y zona climática 3. El modelo CF 38 se ajusta a los requerimientos de planta. Este equipo recibe el agua condensada del:

- Postenfriador de los tres compresores.
- Secador refrigerativo.
- Eco-drain del sistema de filtrado.
- Purga automática del tanque de almacenamiento 1.

		AQUAMAT						
		CF 3	CF 6	CF 9	CF 19	CF 38	CF 75	CF 168
Flujo volumétrico máx. para compresores de tornillo/rotativos refrigerados por aceite y tipo de aceite en zona climática 1*								
S-460, MOL, MOH, PAO, VCL	m ³ /min	2,1	4,2	6,5	13	25,9	51,8	80
VDL	m ³ /min	2,8	5,5	8,5	16,9	33,6	67,3	100
Flujo volumétrico máx. para compresores de tornillo/rotativos refrigerados por aceite y tipo de aceite en zona climática 2*								
S-460, MOL, MOH, PAO, VCL	m ³ /min	1,9	3,8	5,6	11,3	22,5	45	70
VDL	m ³ /min	2,4	4,9	7,3	14,6	29,3	58,5	90
Flujo volumétrico máx. para compresores de tornillo/rotativos refrigerados por aceite y tipo de aceite en zona climática 3*								
S-460, MOL, MOH, PAO, VCL	m ³ /min	1,6	3,2	4,8	9,6	19,1	38,3	40
VDL	m ³ /min	2,1	4,2	6,2	12,5	24,9	49,7	50

Figura 96. Especificaciones técnicas para la selección del AQUAMAT

Fuente: KAESER Compressors (s.f.).

Se estimó la taza de condensación de agua mediante la herramienta de cálculo de la página web de Kaeser Costa Rica, los datos se muestran en la Figura 97 y se tiene que el agua total contenida en el aire es de 4,88 gal/h. En el post enfriador del compresor se condensan aproximadamente 3,36 gal/h. Durante el proceso de secado se precipitan cerca de 1,38 gal/h. Finalmente, el contenido de agua que queda en el aire comprimido es de 0,14 gal/h y este pasa al tanque de almacenamiento donde se condensa la mayor parte, el restante contenido de agua es transportado por el aire en las tuberías hacia el interior de planta.

Actualmente, el tanque pulmón #1 ubicado en el cuarto de compresores cuenta con un sistema de purga manual, donde el técnico de mantenimiento debe ir y abrir la llave, en algunos casos la deja abierta debido a la gran cantidad de agua y esto conlleva a una pérdida de aire comprimido considerable, además que, en caso de no realizarse, el condensado ingresa a la tubería afectando los equipos de proceso. Se cotizó el cambio a una purga automática que garantice una adecuada extracción de condensados garantizando la calidad de aire adecuada de manera eficiente y evitando las pérdidas de aire comprimido. El monto presentado por

ENERZA es de $\$870\,805,66$ (\$1 455), la cual incluye la canalización de la alimentación, el panel de control, la electroválvula, así como las conexiones y puesta a tierra.

Aire ambiente		
Aire de admisión del compresor	406	cfm
Temperatura ambiente	90	°F
Presión ambiente	12.9	psi
Humedad relativa	80	%
Humedad máxima	33.49	g/m ³
Fujo nominal de agua por hora	4.88	gal/hour
1. Compresor		
Flujo nominal bajo condiciones de trabajo	52.37	cfm
Temperatura del aire comprimido (enseguida del postenfriador)	112.28	°F
Presión de trabajo absoluta	100	psi
Humedad relativa	100	%
Humedad máxima	64.848	g/m ³
Tasa de condensación/hora	3.36	gal/hour
2. Secador		
Flujo nominal bajo condiciones de trabajo	52.37	cfm
Punto de rocío del secador (-112°F .. +104°F)	37.4	°F
Punto de rocío atmosférico	-4	°F
Presión de trabajo absoluta	100	psi
Humedad relativa	100	%
Humedad máxima	5.953	g/m ³
Tasa de condensación/hora	1.38	gal/hour
Precipitación total		
Tasa de condensación/hora	4.74	gal/hour

Figura 97. Cálculo de la tasa de condensación del sistema de aire comprimido de la planta.

Fuente: Kaeser Compressors (s.f.).



Capítulo 6. Estudio técnico y financiero del proyecto

6.1 Estudio técnico de la red de aire comprimido

Durante la evaluación de la red de aire comprimido se pusieron en evidencia ciertos aspectos técnicos que ponen en tela de juicio la instalación actual de la tubería de aire comprimido y justifican la inversión del proyecto con medidas no financieras, a continuación, se desarrollarán estos puntos.

6.1.1 Ciclo de vida útil de la red actual

Como todo equipo, una instalación de aire comprimido requiere de una inversión inicial, mantenimiento, repuestos y cumple, además, con un ciclo de vida útil. De acuerdo con distintas opiniones de expertos en el área, una red de tuberías de aire comprimido en general con una buena gestión de mantenimiento y un buen sistema de tratamiento de aire, puede durar cerca de 20 años en buenas condiciones. Después de ese tiempo, el desgaste y la corrosión comenzarán a generar problemas de fugas y de integridad mecánica, lo cual requerirá ir reemplazando secciones de tubería.

Debido al desgaste y la corrosión generada por un mal tratamiento del aire, la tubería libera partículas de óxido, las cuales llegan a los filtros y equipos, donde pueden generar sobrecostos en mantenimiento, obstrucción de válvulas o daños graves en los mismos, como ya ha sucedido con varias de las máquinas del proceso; el caso más reciente fue la obstrucción de la válvula silenciadora-reguladora de la inyectora que se mencionó en la sección de paros de proceso.

Además, existe evidencia de partículas de óxido presentes en uno de los filtros de una unidad de mantenimiento, como se mostró en la Figura 47, junto con la presencia de harina de *rendering*, la cual ha ingresado a la tubería. Estas partículas se acumulan y reducen el diámetro de la tubería perjudicando el caudal de aire, volviéndolo más turbulento, aumentando la velocidad del aire que repercute en mayor desgaste y una caída de presión mayor, como se evidencia en los registros de presión mostrados en la sección 4.2.9.6, donde se tiene una pérdida de presión del 9%.

El sistema de tubería actual supera los 20 años, el mantenimiento ha sido mínimo y dado el problema con el secador, ya han pasado dos años con humedad y agua dentro de las tuberías, lo cual genera problemas de corrosión.

6.1.2 Capacidad de ampliación

Toda instalación industrial de tuberías que transporte un fluido está limitada a un caudal máximo de transporte. Desde el diseño se debe contemplar un factor para ampliaciones que se lleguen a dar con los años. En este caso, la red de tuberías y la demanda de aire comprimido han aumentado con el paso de los años hasta llegar a las condiciones de trabajo y operación actuales. Con los hallazgos de la evaluación de la red de tuberías de aire comprimido de la sección 4.2.7, queda al descubierto que las tuberías de aire comprimido se encuentran en una condición de saturación.

La planta creció en el pasado sin evaluar el caudal máximo de aire comprimido que podía transportarse, lo cual repercute en la actualidad en mayores caídas de presión, fallas por falta de aire en los equipos de proceso y en mayores consumos energéticos. Este crecimiento sin respaldo ingenieril provoca errores de diseño en la instalación, ya que se dan conexiones improvisadas con manguera y acoples inadecuados, los cuales son puntos propensos de fugas y sin cumplir ningún estándar de diseño o condiciones mínimas como el uso de unidades de mantenimiento, cuellos de ganso o con la inclinación de la tubería adecuada para la recolección de condensados.

Existe un proyecto de ampliación de la planta procesadora de pollo, el cual involucra el crecimiento del espacio físico de la planta y aumentar la capacidad de producción, lo cual conlleva a la adquisición de equipos consumidores de aire comprimido.

Al ser un proyecto de ampliación en fase de planeación, aún no existen detalles o planos del crecimiento, sin embargo, bajo la condición actual de saturación de las tuberías y dado el volumen de almacenamiento de aire comprimido, es inviable agregar más equipos a la red, sin realizar el cambio de la tubería actual.

6.1.3 Confiabilidad del sistema de aire comprimido

El sistema de aire comprimido es un servicio crítico en la planta de procesamiento de pollo, ya que la ausencia de aire comprimido detiene por completo el proceso productivo. Es ahí donde radica la importancia de asegurar un 100% de confiabilidad en la generación, almacenamiento y transporte del aire comprimido. Es decir, el sistema de aire comprimido desempeña su función requerida, bajo los parámetros de operación definidos durante el tiempo establecido.

En cuanto a la generación, el sistema de aire comprimido cuenta con 100% de confiabilidad, dado que los compresores tienen la capacidad de suplir el 177% de la demanda promedio de aire comprimido a la presión que requieren los equipos y se cuenta con un convenio de mantenimiento con Kaeser, el cual asegura el correcto funcionamiento de los equipos en todo momento.

En la etapa de tratamiento del aire comprimido se tiene una gran deficiencia debido al problema que se detectó en el secador de aire, por lo tanto, no se suplir el aire comprimido en las condiciones de humedad y particulado que requiere el proceso.

Por su parte, en el tema del almacenamiento, actualmente no se cumple con el volumen mínimo requerido para compensar los picos de demanda, esto quedó evidenciado en los registros de descarga del *blow tank*, donde la presión decaía hasta 50-60 psi durante la carga de cocinas.

En el ámbito del transporte, se tiene otro punto débil de la red de aire comprimido, ya que, como se demostró anteriormente, se presenta una condición de saturación y deterioro, las cuales incurren en mayores costos energéticos y de mantenimiento. Actualmente, la parte de transporte de aire comprimido causa una baja en la confiabilidad del sistema debido a los problemas que ocurren durante el año, los cuales detienen el proceso productivo y producen fallas en los equipos que incrementan los costos de mantenimiento.

Con el diseño propuesto, se solventará el problema de la caída de presión debido al *blow tank*, al incorporar al sistema un nuevo tanque de almacenamiento de 3m³ que permita cumplir con el volumen mínimo del reservorio de aire comprimido, el cual se determinó que debe ser mayor a 9,36 m³. Se dimensiona el

diámetro de tubería adecuado para caudal que fluye más un porcentaje para ampliaciones futuras; además, minimizará las pérdidas de carga, reducirá las pérdidas por fricción y asegura un diseño que cumpla con los estándares de Cargill para las instalaciones de aire comprimido.

Dentro de los estándares de diseño de la red de aire comprimido, se busca atacar las deficiencias en las conexiones a los equipos o bajantes, ya que en la red actual la mayoría de esas conexiones se realiza con mangueras o se han realizado de manera improvisada y se quedaron así, las cuales son más propensas a fugas, a detener un equipo y presentan una mayor caída de presión. En la Figura 98 se muestra una de las muchas conexiones inadecuadas hechas con mangueras, en este caso son 4 bombas de diafragma alimentadas del mismo bajante.



Figura 98. Diseño inadecuado de bajante y conexión a equipos del sistema centralizado de aseo, en bodega de químicos.

Fuente: elaboración propia.

6.1.4 Consideraciones de Seguridad (EHS)

Como principio básico de Cargill: “La seguridad no es negociable”.

La seguridad en sistemas de aire comprimido es importante, ya que puede generar lesiones a las personas, a pesar de que el aire atmosférico no es tóxico, al someterlo a presión aumenta la concentración, lo cual puede causar daños a la salud, también al contener partículas o contaminantes que pueden causar accidentes por impacto de material a alta velocidad.

Dentro de las condiciones de seguridad que se buscan atacar con el diseño de la red se encuentran:

1. No permitir el uso del aire comprimido a más de 3 bar (45 psi) para limpieza del personal y siempre utilizar protección facial.
2. Utilizar silenciadores para atenuar ruido producido en las aplicaciones en las cuales el aire comprimido se libere a alta presión.
3. Implementar acoples de seguridad que permitan despresurizar la línea antes de desacoplar una conexión.
4. Utilizar racores o conectores de una sola medida, sea inglesa o milimétrica, que soporten las condiciones ambientales y de presión.
5. Implementar el uso de carretes para arrollar las mangueras y evitar posibles caídas o accidentes por tropiezos.
6. Cuando se presurice una línea, realizarlo de forma progresiva para evitar que las partículas puedan ser arrojadas a alta velocidad.
7. Utilizar sistemas de seguridad de bloqueo y etiquetado en las válvulas para evitar la manipulación por el personal no autorizado.
8. Identificar las tuberías con el color azul respectivo para aire comprimido y con los lineamientos que establece la normativa oficial para la utilización de colores en seguridad y su simbología del Decreto n°12715 del gobierno de Costa Rica.

6.1.5 Estudio financiero de los diseños propuestos.

En el proceso de análisis financiero se contemplaron cuatro empresas, las cuales, a través del Departamento de proyectos de Cargill, fueron convocadas mediante un formato llamado Remedy For Project (RFP). Se realizó la reunión en la cual se explicó el proyecto, este sería del tipo llave en mano. El estudio financiero se generó con formato de Cargill para evaluar proyectos, el cual tiene validez en cualquier país. Los datos que se requieren para montar el estudio en el formato son:

- Taza de descuento: esta tiene un valor establecido por Cargill de 10,5%, como la empresa se financia con su propio capital, este valor únicamente se toma en cuenta para el cálculo del VAN (NPV).
- Impuesto sobre la renta: este valor se rige de acuerdo con el país en donde se vaya a realizar el proyecto, en este caso para Costa Rica el impuesto sobre la renta es del 30%, según el Ministerio de Hacienda (2019).
- Vida útil del proyecto: a nivel interno, Cargill desarrolló una base de datos donde establece la vida útil de una gran cantidad de activos, como equipos, instalaciones, tuberías, vehículos, entre otros. En este caso, se cataloga como tuberías (piping). En la base de datos internacional se estipula una vida útil de 8 años, mientras que en la base de datos nacional una vida útil de 20 años. Se toma como referencia el valor de 10 años.
- Ingresos netos: este rubro corresponde a todos los ingresos o ahorros que se obtendrán con el proyecto planteado. Estos incluyen ahorros energéticos, beneficios en el proceso productivo, mejoras en el rendimiento de los equipos, entre otros.

Los ingresos netos determinados durante el desarrollo del proyecto se deben a aquellos problemas o deficiencias que se solucionan con el diseño de la nueva red de tuberías y se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Ingresos netos para el estudio financiero del proyecto de diseño de la red de aire comprimido.

Ingresos netos	
Ahorro energético por fugas	\$9 000
Ahorro de energía por caída de presión	\$673
Ahorro de energía por caída de presión debido al blow tank	\$570
Ahorro virtual debido afectación por paros	\$15 580
Ingreso neto total	\$25 823
Ingreso neto total (en 000's)	\$26

Se solicitó la cotización de los dos diseños, el A (tres anillos independientes) y el B (dos anillos, *rendering* y primario-secundario juntos), esto para validar en cuanto a la instalación y materiales qué es más rentable: tener anillos independientes de menor diámetro o instalar un diámetro mayor de tubería y reducir la cantidad de anillos. Además, a todas las cotizaciones se les agregó un 10% al monto de inversión, el cual cubrirá los gastos adicionales que se incurran durante la instalación de la tubería.

6.1.5.1 Propuesta de Facility & Supply

Una nota importante sobre las cotizaciones de la empresa Facility and Supply es que no se presentó a la exposición del proyecto, donde se explicaron a detalle los requerimientos y condiciones, además, se realizó un recorrido por la planta, con el fin de ver el espacio físico disponible para la instalación de las tuberías, por lo que la cotización que presentaron puede no ajustarse a los requisitos deseados o presentar errores que durante la realización de la obra provoquen sobre costos.

La cotización presentada para el diseño A es por un monto de \$51 975, incluyendo los \$1 600 por instalación del tanque de almacenamiento, agregándole un 10% de contingencia, se obtiene un monto de inversión de \$59 000. Al realizar el análisis financiero con el formato de Cargill, se obtiene un VAN de \$61 000, una TIR de 32,2% y un periodo de recuperación de 2,9 años.

Para el diseño B se tiene un monto de inversión de \$44 885, sumando la instalación del tanque y la contingencia, se obtiene un monto de inversión final de \$51 000, un VAN de \$68 000, una TIR de 37,6% y se recupera la inversión en 2,5 años. En ambas cotizaciones la garantía dada por la empresa es de un año.

6.1.5.2 Propuesta de Kaeser

Para el diseño A, la empresa Kaeser presentó una cotización por un monto de \$55 151, en este caso la oferta ya incluye la instalación del tanque de almacenamiento, por lo que únicamente hay que sumar el 10% de contingencia para un monto final de \$61 000. Realizando en estudio financiero, se obtiene un VAN de \$60 000, una TIR de 31,1% y un periodo de recuperación de 2,9 años.

Para el diseño B, la cotización es de \$62 881, sumando el porcentaje de contingencia se obtiene un monto de inversión de \$69 000. Este estudio arroja un VAN de \$53 000, una TIR del 27% y la inversión se recupera en 3,3 años. En cuanto a términos de garantía, esta empresa únicamente ofrece garantía por defectos de fábrica de la tubería y excluye el caso de mala instalación.

6.1.5.3 Propuesta de ENESA

Las ofertas presentadas por ENESA para la cotización del proyecto incluyendo el porcentaje de contingencia son:

Diseño A: monto de inversión \$66 000, VAN \$55 000, TIR 28,5% y se recupera en 3,1 años.

Diseño B: monto de inversión \$77 000, VAN \$46 000, TIR 23,8% y se recupera en 3,6 años.

En términos de garantía, ENESA ofrece 10 años en el material y no se indica si por instalación hay un periodo de garantía.

6.1.5.4 Propuesta de Grupo Flotec

En el caso de Grupo Flotec, tuvieron un retraso el día de la reunión y se presentó en forma resumida el proyecto, no se realizó el recorrido *in situ*, sin embargo, esta empresa ya estaba enterada del proyecto y conoce la planta.

La oferta presentada por Grupo Flotec para el diseño A es de un monto de inversión de \$82 000 y como resultado del estudio financiero se obtiene un VAN de \$42 000, una TIR de 22,0% y la inversión es recuperada en 3,8 años.

Para el diseño B se obtiene un monto final de inversión de \$86 000 y mediante el estudio financiero se obtiene un VAN de \$39 000, una TIR de 20,7% y se recupera la inversión en 4 años.

6.1.5.5 Resumen del estudio financiero

A modo de resumen, en la Tabla 9 se muestran los montos de inversión desglosados por cada empresa para cada diseño; se encuentran ordenados de menor a mayor monto de inversión contemplando el 10% de contingencia. Además, se colocan los términos generales de garantía.

Tabla 9. Cuadro resumen de las cotizaciones propuestas por las cuatro empresas para el proyecto.

Empresa	Monto cotización			10% de contingencia		Garantía	
	Diseño A	Diseño B	Tanque #3	Diseño A	Diseño B	Tubería	Instalación
Facility&Supply	\$52	\$45	\$1,6	\$59	\$51	-	1 año
KAESER	\$55	\$63	-	\$61	\$69	1 año	Se excluye
ENESA	\$60	\$70	-	\$66	\$77	10 años	-
Grupo Flotec	\$73	\$77	\$1,5	\$82	\$86	10 años	1 año

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en el cuadro resumen de la Tabla 9, el diseño A que contempla tres anillos independientes es el proyecto de menor inversión para ENESA, Grupo Flotec y Kaeser; en el caso de Facility and Supply, el diseño B resulta ser el de menor inversión, sin embargo, como se comentó anteriormente, puede existir un error de comprensión del proyecto al no presentarse a la reunión, por política de la empresa esta oferta queda descartada debido al incumplimiento del protocolo de proyectos.

Con base en los resultados de los cálculos financieros que se muestran en la Tabla 10 y en la Tabla 11, se puede evidenciar que el diseño A es más rentable que el diseño B, dado que presenta mejores periodos de recuperación y una TIR mayor. De modo que el diseño B financieramente puede descartarse y continuar el análisis con las propuestas presentadas por las empresas del diseño A. Además, se puede inferir que es menos rentable diseñar redes de aire comprimido que abarquen el total de consumo, es más recomendable subdividir en anillos más pequeños.

Tabla 10. Cuadro resumen del estudio financiero en formato Cargill para el diseño A

Diseño A				
Empresa	Inversión (000`s)	VAN NPV (000`s)	TIR IRR	PR PB (años)
Facility Supply	\$59	\$61	32,2%	2,9
KAESER	\$61	\$60	31,1%	2,9
ENESA	\$66	\$55	28,5%	3,1
Grupo Flotec	\$82	\$42	22,0%	3,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Cuadro resumen del estudio financiero en formato Cargill para el diseño B

Diseño B				
Empresa	Inversión (000`s)	VAN NPV (000`s)	TIR IRR	PR PB (años)
Facility Supply	\$51	\$68	37,6%	2,5
KAESER	\$69	\$53	27,0%	3,3
ENESA	\$77	\$46	23,8%	3,6
Grupo Flotec	\$86	\$39	20,7%	4,0

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 10 se muestran los resultados del estudio financiero del diseño A para cada empresa. La propuesta presentada con mayor rentabilidad es la de Facility and Supply, sin embargo, como se comentó anteriormente, esta empresa faltó a los protocolos de proyectos establecidos por Cargill.

Por lo tanto, la siguiente opción en cuanto a rentabilidad es la presentada por Kaeser, sin embargo, esta empresa no incluye garantía por instalación y defectos de fábrica y la diferencia con respecto a ENEZA en inversión es de \$5 000, para un monto final de \$66 000, además, esta sí presenta condiciones de garantía de 10 años por defectos de fábrica. Financieramente se tiene una TIR de 28,5% mayor al 25% que Cargill establece como viable. En cuanto al periodo de recuperación, se tienen 3,1 años, la política de proyectos de Cargill establece que se debe recuperar la inversión en al menos 5 años para ser aprobado, por lo tanto, en términos financieros y de respaldo la mejor opción es la propuesta de ENEZA.

La propuesta de Flotec presenta el mayor período de recuperación y la menor TIR con un 20,7%, por lo tanto, esta es la opción financieramente menos viable.



Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Se logró diagnosticar la situación actual de la red de aire comprimido y determinar la capacidad de generación, la clase requerida de calidad de aire, la red de tuberías, así como el uso y consumo de la energía.
2. Se determinaron las oportunidades de mejora del sistema actual de aire comprimido y se propusieron acciones correctivas que mejoran la eficiencia y reducen los costos energéticos.
3. Se elaboraron dos propuestas de diseño de la red de aire comprimido que aseguran la calidad de aire requerido por el proceso y contemplan las oportunidades de mejora detectadas, además, permiten la ampliación de la planta.
4. Se compara la instalación actual contra los diseños propuestos contemplando los ahorros energéticos, las ampliaciones futuras y la confiabilidad del sistema, y se determina que es viable realizar el rediseño de la red. La propuesta de ENESA cumple con los términos de garantía y se requiere una inversión de \$66 000 para un periodo de recuperación de 3,1 años, una TIR del 28,1% y un VAN de \$55 000.

7.2 Recomendaciones

1. Incluir la red de aire comprimido al sistema de gestión de mantenimiento, con el fin de realizar el mantenimiento adecuado de los accesorios como unidades de mantenimiento, tuberías y válvulas.
2. Adquirir el sistema de tratamiento de condensados AQUAMAT para cumplir con el reglamento de vertido y reuso de aguas residuales del MINAE.
3. Evaluar la capacidad de ampliación de una tubería antes de ingresar nuevos equipos a la red de aire comprimido.
4. Realizar el cableado del secador de aire para incorporarlo al SAM 4.0.
5. Continuar con el monitoreo del consumo energético del sistema y el seguimiento del indicador de producción propuesto de kWh/ave, para mantener el sistema de aire comprimido dentro del ciclo de mejora continua.
6. Incluir a la rutina de mantenimiento las inspecciones de fugas por ultrasonido para continuar con la mejora y eficiencia del sistema.
7. Realizar el bloqueo y etiquetado de las válvulas que deben estar cerradas para evitar paros de planta y riesgo a la salud de los asociados.
8. Evitar el uso de gazas metálicas para realizar el acople del equipo al punto de toma, ya que son puntos vulnerables a fugas.
9. Minimizar la longitud de conexión con mangueras, para reducir la caída de presión entre el usuario y el punto de toma.



Capítulo 8. Referencias bibliográficas

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2017). *Guía de implementación de Sistemas de Gestión de la Energía basados en ISO 50001* (4ta. ed.). Chile. Recuperado de <https://www.guiaiso50001.cl/guia-de-apoyo/>
- Alfaro, R. (2007). *Ahorro energético en el sistema de aire comprimido en la planta de Hospira Holdings de Costa Rica* (Proyecto de graduación de Licenciatura en Mantenimiento industrial.). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Atlas Copco. (2009). Aire comprimido. *Aportando soluciones, comprimiendo costos* (58).
- Atlas Copco Compressors, LLC. (s.f.). *Áreas de oportunidad para mejorar un sistema de aire comprimido y obtener ahorros de energía*. Recuperado de <https://www.atlascopco.com/es-pa/compressors/wiki/compressed-air-articles/cost-saving-opportunities>
- Atlas Copo Airpower NV. (2011). *Manual del aire comprimido* (7° ed). Bélgica: Atlas Copo Airpower NV.
- Beko. (Diciembre 2010). Ahorro energético en los sistemas de aire comprimido. *Automática e Instrumentación*, 63-65.
- BOGE compressed air systems. (s.f.). *Catálogo de compresores de tornillo*. Recuperado de <https://www.boge.com/es/compresores-de-tornillo>
- Bonilla, J. M. (2014). *Diseño de la red principal de aire comprimido de la planta CEMEX, Colorado Costa Rica* (Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Cárdenas, M. (Marzo- abril 2009). El costo del aire comprimido. *Mantenimiento*, 12,(64), 16-18.
- Cargill. (2018). *Sobre Cargill (Cargill en Centroamérica)*. Recuperado de <https://www.cargill.com.hn/es/sobre>
- Carnicer, E. (1994). *Aire comprimido*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Córdoba, L. (2016). *Ahorro de energía en el sistema de aire comprimido, siguiendo el programa Lean Energy de Baxter Productos Médicos* (Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

- Edder Zaldívar Arquitectos. (2015). Levantamiento aire comprimido PIPASA SR [Planos realizados para Cargill]. Datos duros inéditos.
- Espíndola, C., y Valderrama, J. (2012). Huella de Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información Tecnológica*, 23(1),163-176.
- Fallas, F. (2018). *Evaluación y rediseño de la red de aire comprimido de la empresa alimentos Pro-Salud S.A.* (Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- FESTO. (2013). *Calidad del aire comprimido en la industria alimentaria y de bebidas*. Recuperado de https://www.festo.com/rep/es_es/assets/pdf/FOOD_manual_compressed_air_es.pdf
- García, O. (2014). Fórmula Dupont y su rentabilidad, vista desde la óptica administrativa. *Inquietud empresarial*, XIV (2), 89-113.
- Garro, A. (2017). Aire Comprimido [Compendio de información]. Datos duros inéditos.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2018a). *Condiciones Actuales del Tiempo. Estación Automática del tiempo Aeropuerto Juan Santamaría- Pista 07*. Alajuela, Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacioncoco.html>
- Instituto Metereológico Nacional (IMN). (2018b). *Factores de emisión gases efecto invernadero*. San José, Costa Rica. Recuperado de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/factoresemision/factoresemision2018/offline/download.pdf>
- INTECO. (2011). *INTE/ISO 50001:2011 Sistemas de gestión de la energía- Requisitos con orientación para su uso*. INTECO.
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 8573-1:2010 Compressed air*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/46418.html>

- Kaeser Compresores de Costa Rica. (2017). Corporación PIPASA S.R.L- Estación 2. San José, Costa Rica [Informe propiedad de Cargill]. Datos duros inéditos.
- Kaeser Compresores. (s.f.). *Técnica de aire comprimido, Fundamentos y consejos prácticos*. Recuperado de <https://mx.kaeser.com/recursos-de-aire-comprimido/descargas/>
- Kaeser Compressors. (2010). *Energy Savings in compressed air systems*. Fredericksburg, United States of America. Recuperado de http://kaeser.ca/Images/USGUIDE4_EnergySavingsGuide-tcm67-17483.pdf
- Kaeser Compressors. (s.f.). *Compressed Air Engineering, Basic principles, tips and suggestions*. Recuperado de <http://www.kaeser.cz/Images/P-2010-ED-tcm21-6752.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2007). *Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales. N°33601-MINAE-S*. San José, Costa Rica: MINAE.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2015). *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030* (1ed.). San José, Costa Rica: Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD.
- PREVOST. (2019). *Prevost Piping System, La red de aire comprimido. Concepto 100% aluminio*. Canadá: PREVOST.
- Romero, J. (2018). *Estudio de viabilidad financiera, ambiental y energética para la sustitución de una de las calderas de búnker por una de biomasa en la planta San Rafael de la empresa Cargill Costa Rica* (Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Solano, F. (2017). *Evaluación y rediseño de la red de distribución de aire comprimido de la empresa EXTRALUM* (Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Squire Cogswell Aeros Instruments, Inc. (s.f.). *ACFM vs SCFM vs ICFM*. Series of technical white papers from Squire-Cogswell.

- Tecnologías Predictivas. (2019). Presentación cálculo costo energético de fugas [Presentación de la empresa]. Datos duros inéditos..
- Torrent, M. (Febrero 2014). Generación de aire comprimido. *Automática e Instrumentación*, (459), 72-79.
- Torres, Y. (2015). *Diagnóstico de la red de aire comprimido de la planta de yogurt de SIGMA alimentos en Cartago* (Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial). Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- UNE Normalización Española. (2015). *UNE-EN ISO 11011:2015 Aire comprimido, eficiencia energética, Evaluación*. Madrid: AENOR.



Capítulo 9. Apéndices

9.1 Auditoría Cuarto de compresores

Instalación correcta de las tuberías de aire comprimido y condensados		Cumple	No cumple	Comentarios
1	Conexión de las tuberías de distribución de aire comprimido. Uso de un colector o <i>manifold</i> . Permite cerrar por sectores el aire comprimido.		x	La conexión de tuberías se realiza en la propia tubería principal hacia planta.
2	Instalación en el sector húmedo. Tuberías de los compresores al secador deben contar con una inclinación y punto de purga.		x	No cumple con la inclinación adecuada (2,5cm/30m de longitud).
3	Conexión correcta de los componentes. Debe ser desde arriba con la tubería principal, cuello de ganso.		x	La conexión de tuberías se realiza de costado.
4	Conexión de los compresores. Deber ser con un medio elástico que minimice las vibraciones.	x		Mejorar el soporte mecánico de la tubería vertical.
5	Eliminación segura del condensado. Las conexiones son adecuadas y sin fugas.		x	Se tiene una maguera rota. No existe tratamiento de condensados, el agua con aceite se dispone al ambiente sin tratar (Instalar aquamat).
6	Las conexiones a tubería de colectores de condensado cuentan con válvula de cierre.		x	No cuenta con válvulas de bola para el cierre.
7	Tamaño de la tubería colectora (al menos 1/2").	x		
8	La conexión de la tubería colectora debe ser desde arriba.		x	La conexión se realiza de costado con inclinación hacia abajo.
Instalación correcta de los compresores		Cumple	No cumple	Comentarios
9	Limpieza de la estación de compresores.		x	Presencia de polvo sobre los compresores, falta de filtrado del aire ambiental. Posible afectación de los filtros.
10	Temperaturas moderadas entre (menor a 45°C).	x		Compresor CSD 75: no indica. Compresor ASD 40 #2: 36,9°C Compresor ASD 40 #3: 36,7°C
11	Tubería de transporte de aire caliente al exterior.	x		
12	Ventilación del secador refrigerativo.		x	El secador no cuenta con ductos para extracción del calor al exterior.
Total, cumplimientos		4		
Total, incumplimientos			8	

Fuente: Kaeser Compresores (s.f.).

9.2 Cotización purga automática



CEL6420-4408 / 64204406 San Pedro de Poas de Alajuela, Costa Rica
Ced. Jurídica 3-101-710361 E-mail: info@enerzac.com

San Pedro de Poas, 18 febrero del 2019

Cotización No: 1083-182019-PPKM

Atención: Jorge Romero

Referencia: purga tanque principal.

Estimado.

Le detallo nuestra propuesta económica para los siguientes puntos.

- Canalización para de alimentación 120V desde tablero del CCM del render hasta tablero de control
- Armado de panel de control con temporizador para purga de tanque principal
- Suministro de electroválvula para purga
- Conexiones y puesta en marcha.

Materiales:

Acometida purga

Breaker QO 120 1P/20A presion

Tubo conduit EMT 13mm UL RYMCO

Conector conduit EMT 13 mm presion Crouse Hinds

Union conduit EMT 13 mm presion crouse hinds

Gasa EMT 1 hueco 13 mm USA

electro valvula 1/2 bobina 120V

Conduleta EMT 13 mm tipo C

Gabinete poliester 300X250X140 mm IP66 con fondo falso

Breaker 1P 2A de control, para riel DIN

riel ding

borner 2.5 mm

cable control

Rele Temporizador RE7TRL13BU Schneider Off Delay 2NA 2NC 0,05 a 300h

Ducto plastico Ranurado 25X40X2 mts KKC2540 Klemsan con tapa

Cable THHN # 12 AWG Verde

Cable THHN # 12 AWG blanco

Cable THHN # 12 AWG Rojo

MONTO.

Monto Venta Materiales	¢458 100,00
Monto Mano de Obra	¢353 152,66
Total sin IV	¢811 252,66
13% impuesto materiales	¢59 553,00
Total IVI	¢870 805,66

El monto total de esta Oferta es de ochocientos setenta mil ochocientos cinco colones con 66/100.

VIGENCIA DE LA OFERTA

- Esta oferta tiene una vigencia de 15 días hábiles a partir de esta presentación.

TIEMPO DE ENTREGA

- 3 días

9.3 Cotización de materiales para tubería del secador de aire

OFERTA ECONOMICA

Pos.	Denominación	Material	Cantidad	UM	Precio USD	Total USD
10	tubo Azul DN 90 - L = 6000	ES8290009006	1.000	PZA	282.90	282.90
20	D90mm (3 1/2") x 3" NPT Recto Macho	ES8202009024	4.000	PZA	92.00	368.00
30	D90mm (3 1/2") Codo igual 90°	ES82050090	5.000	PZA	143.52	717.60
40	D90mm (3 1/2") Abrazadera	ES89901090	10.000	PZA	3.63	36.30
SUBTOTAL						1,404.80
	IVA		0.00			0.00
	Total en USD					1,404.80

Garantía:

1 año por defectos de fabricación para el resto de componentes. Se excluye el caso de mala instalación, mala operación, daño intencional, desastres naturales y variaciones drásticas en energía eléctrica.

Condiciones de pago

30 dias credito

Precios no incluyen el 13% de I.V.

Entrega (Incoterms®2010)

EXW Costa Rica

9.4 Cotizaciones ENESA

EQUIPOS NEUMATICOS S.A.

Ced. Jur.: 3-101-196524
 De Servicentro La Tropicana 300 Sur
 Alajuela Apdo. 142-4050
 Tel/Fax: 2440-2393, Tel. 2441-2627
 E-mail: equiposneumaticos@enesa.net



Fecha: 03 de mayo del 2019
 Cotización N°: 099TB-2019

OFERTA ECONÓMICA

Diseño A

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	Sistema de tubería modular en aluminio AIRNET Incluye: Tubería, accesorios, fijaciones	\$41.985	\$41.985
56	Filtro regulador y lubricador Incluye: Manómetro	\$175	\$9.800
1	Instalación de tubería modular en aluminio AIRNET	\$14.975	\$14.975
Subtotal 1:			\$66.760
Descuento:			\$6.676
Subtotal 2:			\$60.084
Impuesto de Ventas:			\$7.811
Precio Total:			\$67.895

EQUIPOS NEUMATICOS S.A.

Ced. Jur.: 3-101-196524
 De Servicentro La Tropicana 300 Sur
 Alajuela Apdo. 142-4050
 Tel/Fax: 2440-2393, Tel. 2441-2627
 E-mail: equiposneumaticos@enesa.net



Fecha: 03 de mayo del 2019
 Cotización N°: 099TBV2-2019

OFERTA ECONÓMICA

Diseño B

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	Sistema de tubería modular en aluminio AIRNET Incluye: Tubería, accesorios, fijaciones	\$52.645	\$52.645
56	Filtro regulador y lubricador Incluye: Manómetro	\$175	\$9.800
1	Instalación de tubería modular en aluminio AIRNET	\$14.975	\$14.975
Subtotal 1:			\$77.420
Descuento:			\$7.742
Subtotal 2:			\$69.678
Impuesto de Ventas:			\$9.058
Precio Total:			\$78.736

9.5 Cotizaciones Facility and Supply

Diseño A

Detalle de la Cotización

- 2 bajantes en Ø 40 mm con válvula de bola y acople para conexión de 1 1/4".
- Anillo R (Rendering)
 - 80 mts. de tubería Ø 40 para Anillo Rendering.
 - 11 bajantes en Ø 20 mm con válvula de bola, Unidad de Mantenimiento F.R.L. y acople de seguridad.
 - 5 bajantes con válvula del bola y acople de seguridad.

Atentos a cualquier consulta,

Subtotal: \$ 51,975.00
Impuesto: \$ 6,756.75
Total: \$ 58,731.75

ING. CARLOS BARRANTES PINEDA
 Teléfono: 89265000
 EMAIL: 89265000@facility.cr

Notas:

Diseño B

Condiciones de la Venta

Correo: itdm_dmas_merendez@cargill.com

Moneda: Dólares
 Suministro: Local

Vigencia de la oferta: 30 DIAS
 Forma de pago: SEGUN OBSERVACIONES

Garantía: 1 año

Tiempo de entrega: SEGUN OBSERVACIONES

Detalle de la Cotización

- Anillo R (Rendering)
 - 80 mts. de tubería Ø 40 para Anillo Rendering.
 - 11 bajantes en Ø 20 mm con válvula de bola, Unidad de Mantenimiento F.R.L. y acople de seguridad.
 - 5 bajantes con válvula del bola y acople de seguridad.

Atentos a cualquier consulta,

Subtotal: \$ 44,885.00
Impuesto: \$ 5,835.05
Total: \$ 50,720.05

ING. CARLOS BARRANTES PINEDA
 Teléfono: 89265000
 EMAIL: 89265000@facility.cr

Notas:

Tanque de almacenamiento

Detalle de la Cotización

Item	Código	Descripción	Cantidad	Precio	Exento	Gravado
1		1 Instalación de tubería y accesorios en Aluminio marca Eqofluids para Aire Comprimido para la conexión del Tanque pulmón de 3000 lts. del área Rendering de la Planta San Rafael, contiene:	1.00	1,439.00	0.00	1,439.00
		- Conexión de Tanque pulmón 3000 lts. con tubería existente de 2" y 3".				

Atentos a cualquier consulta,

Subtotal: \$ 1,439.00
Impuesto: \$ 187.07
Total: \$ 1,626.07

ING. CARLOS BARRANTES PINEDA
 Teléfono: 89265000
 EMAIL: 89265000@facility.cr

Notas:

9.6 Cotizaciones Grupo Flotec

Diseño A



GRUPO FLOTEC

GRUPO FLOTEC S.A

SAN JOSE, COSTA RICA

E-mail: ventas2@grupoflotec.com / flotec@grupoflotec.com

TEL: +506 2221-5559 FAX: +506 2223-8457

Ced jurídica: 3-101-043123

WWW.GRUPOFLOTEC.COM

Página 10 de 11
005-011-201

CONDICIONES COMERCIALES PRIMERA ETAPA

ITEM	UND	DESCRIPCIÓN	PRECIO UND	TOTAL
1	1	TUBERIA EN ALUMINIO ANODIZADO prevost PARA AIRE COMPRIMIDO DIÁMETRO LÍNEA PRINCIPAL 63 mm	\$38,454.26	\$38,454.26
3	1	MANO DE OBRA POR INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA	\$34,931.33	\$34,931.33
TOTAL EN USA DÓLAR SIN I.V. \$				\$73,385.60

IMPUESTO DE VENTAS NO INCLUIDO*

Diseño B



GRUPO FLOTEC

GRUPO FLOTEC S.A

SAN JOSE, COSTA RICA

E-mail: ventas2@grupoflotec.com / flotec@grupoflotec.com

TEL: +506 2221-5559 FAX: +506 2223-8457

Ced jurídica: 3-101-043123

WWW.GRUPOFLOTEC.COM

Página 10 de 11
005-011-202

CONDICIONES COMERCIALES PRIMERA ETAPA

ITEM	UND	DESCRIPCIÓN	PRECIO UND	TOTAL
1	1	TUBERIA EN ALUMINIO ANODIZADO prevost PARA AIRE COMPRIMIDO	\$40,857.57	\$40,857.57
3	1	MANO DE OBRA POR INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA	\$35,943.83	\$35,943.83
TOTAL EN USA DÓLAR SIN I.V. \$				\$76,801.41

****IMPUESTO DE VENTAS NO INCLUIDO****

9.7 Cotizaciones KAESER

Diseño A

SUBTOTAL		56,979.35
Descuento		1,827.82-
SUBTOTAL		55,151.53
IVA	0.00	0.00
Total en USD		55,151.53

Garantía:

1 año por defectos de fabricación para el resto de componentes. Se excluye el caso de mala instalación, mala operación, daño intencional, desastres naturales y variaciones drásticas en energía eléctrica.

Condiciones de pago

20% anticipo y 60 días crédito

Precios no incluyen el 13% de I.V.

Entrega (Incoterms®2010)

EXW Costa Rica

Diseño B

SUBTOTAL		65,021.85
Descuento		2,140.68-
SUBTOTAL		62,881.17
IVA	0.00	0.00
Total en USD		62,881.17

Garantía:

1 año por defectos de fabricación para el resto de componentes. Se excluye el caso de mala instalación, mala operación, daño intencional, desastres naturales y variaciones drásticas en energía eléctrica.

Condiciones de pago

20% anticipo y 60 días crédito

Precios no incluyen el 13% de I.V.

Entrega (Incoterms®2010)

EXW Costa Rica