



UNIVERSIDAD INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

**DISEÑO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO PARA EQUIPOS NEUMÁTICOS DE
UNA PLANTA INDUSTRIAL**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

Autor

Luis David Luna Marín

Tutor

Ing. Sarmiento Ortiz Fabian Alberto

QUITO– ECUADOR
2025

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, **Luis David Luna Marín**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular con el nombre “**Diseño de una red de aire comprimido para equipos neumáticos de una planta industrial**”, como requisito para optar al grado de INGENIERO INDUSTRIAL y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de **Quito**, a los 1 días del mes de agosto de 2025, firmo conforme:

Autor: Luis David Luna Marín

Firma:

Número de Cédula: 0401702022

Dirección: Pichincha, Quito, Parroquia, Barrio.

Correo Electrónico: lunaluis@indoamerica.edu.ec

Teléfono: 0999966969

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Integración Curricular “**DISEÑO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO PARA EQUIPOS NEUMÁTICOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL**” presentado por LUIS DAVID LUNA MARÍN para optar por el Título INGENIERO INDUSTRIAL.

CERTIFICO

Que dicho Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte los Lectores que se designe.

Quito, 24 de noviembre el 2025

Ing. Fabian Alberto Sarmiento Ortiz Msc.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Integración Curricular, como requerimiento previo para la obtención del Título de INGENIERO INDUSTRIAL, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Quito, 24 de noviembre el 2025

Luis David Luna Marín

0401702022

APROBACIÓN DE LECTORES

El Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: DISEÑO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO PARA EQUIPOS NEUMÁTICOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL, previo a la obtención del Título de INGENIERO INDUSTRIAL, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del Trabajo de Integración Curricular.

Quito, 24 de noviembre de 2025

Msc. Pablo Elicio Ron Valenzuela.

LECTOR

Mg. Arteaga Rodríguez Gerardo Rigoberto

LECTOR

DEDICATORIA

Dedico este logro, antes que nada, a mi madre, quien con su esfuerzo incansable, amor incondicional y fortaleza me ha enseñado que no existen límites cuando se lucha con determinación. Este título no es solo mío, también es suyo, porque cada sacrificio, cada consejo y cada gesto de apoyo han sido el motor que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. A mi familia, por acompañarme con su cariño, comprensión y palabras de aliento en este camino que no siempre fue fácil, pero que se volvió más llevadero gracias a su presencia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para alcanzar esta meta. A mi madre, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación; a mi familia, por su apoyo constante. Extiendo también mi gratitud a mis docentes y compañeros, quienes contribuyeron a mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

TEMA:	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	iv
APROBACIÓN DE LECTORES	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
CAPÍTULO I	1
Introducción	1
Antecedentes	3
Justificación	6
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II	9
Ingeniería del Proyecto	9
Diagnóstico Actual de la Empresa	9

Diagnóstico Técnico de Presión y Caudal en Equipos Neumáticos de la Planta Láctea	13
.....	
Evaluación Semanal de Pérdidas de Producción Asociadas a Deficiencias Neumáticas	17
.....	
Identificación y Priorización de Causas mediante Herramientas de Análisis de Calidad	28
.....	
Diagrama de Pareto.....	29
Diagrama de Ishikawa (causa-efecto).....	31
Área de estudio	30
Modelo Operativo	31
Desarrollo del modelo operativo.....	33
CAPÍTULO III.....	34
Propuesta y Resultados Esperados.....	34
Presentación de la propuesta.....	34
Dimensionamiento del compresor	38
Comparación técnica entre compresores de tornillo y de pistón	43
Tanque pulmón o acumulador	44
Dimensionamiento Secador	47
Dimensionamiento de tubería en la red neumática	51
Validación Técnica del Diámetro de Tubería Seleccionado mediante Cálculos	
Hidráulicos de Mott (2015).....	57

Comparación Técnica de Materiales: Tubería Galvanizada vs. Tubería Termo fusionada (PP/PEAD)	61
Selección de filtro	65
Comparación entre el layout actual y el nuevo diseño de red de aire comprimido	70
Software EPANET	73
Comparación de Producción Semanal - Estado Actual vs. Proyección con Diseño Neumático	79
Resultados esperados	81
Cronograma de actividades.....	84
Análisis de costos.....	85
CAPÍTULO IV	88
Conclusiones y Recomendaciones.....	88
Conclusiones:	88
Recomendaciones:	89
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Uso de sistemas de aire comprimido por sector industrial	2
Tabla 2 Diagnóstico de presión en equipos neumáticos	15
Tabla 3 Diagnóstico de caudal en equipos neumáticos.....	16
Tabla 4 Semana 1 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	18
Tabla 5 Semana 2 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	19
Tabla 6 Semana 3 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	20
Tabla 7 Semana 4 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	21
Tabla 8 Semana 5 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	22
Tabla 9 Semana 6 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido....	23
Tabla 10 Semana 7 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido..	24
Tabla 11 Semana 8 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido..	25
Tabla 12 Causas y porcentaje de pérdidas en la producción por deficiencias neumáticas	30
Tabla 13 Parámetros técnicos requeridos por los equipos neumáticos de la planta	37
Tabla 14 Comparación técnica entre compresores de tornillo y de pistón.	44
Tabla 15 Longitud equivalente por accesorios en la red de aire comprimido	54
Tabla 16 Matriz de ponderación técnica entre tubería galvanizada y tubería termo fusionada (PP/PEAD)	63
Tabla 17 Parámetros técnicos utilizados para el dimensionamiento de la línea neumática	69
Tabla 18 Comparación Layout Actual vs. Layout Propuesto	71
Tabla 19 Proyección de Mejora Productiva tras Diseño de Red Neumática	80

Tabla 20 Análisis de Condiciones Iniciales y Resultados Esperados	82
Tabla 21 Cronograma de actividades	84
Tabla 22 Costos de Equipos y Componentes.....	85
Tabla 23 Costos de Instalación y Mano de Obra	86
Tabla 24 Costos Operativos y de Mantenimiento (Primer Año)	87
Tabla 25 Total, de Costos del Proyecto	87

|

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Layout actual de la empresa de lacitos	12
Figura 2 Unidades planificadas vs. producidas	26
Figura 3 Pérdidas por falla y Horas inactivas	27
Figura 4 Diagrama de Pareto – Pérdidas por fallas en el sistema de aire comprimido ...	31
Figura 5 Diagrama de Ishikawa - Baja productividad por fallas en el sistema de aire comprimido	29
Figura 6 Modelo operativo – Diseño de red de aire comprimido	32
Figura 7 Condiciones ambientales de la planta ubicada en Machachi	38
Figura 8 Compresor de aire comprimido (Tornillo)	39
Figura 9 Compresores industriales de pistón y de tornillo	43
Figura 10 Tanques de aire comprimido	45
Figura 11 Secador Atlas Copco	48
Figura 12 Factores de corrección para temperatura y presión en secadores de aire comprimido	50
Figura 13 Tubería de polipropileno (PP-R)	51
Figura 14 Tabla de caída de presión para tuberías de aire comprimido según caudal y longitud	56
Figura 15 Longitudes equivalentes por accesorios en redes de aire comprimido	57
Figura 16 Comparación entre red abierta y red cerrada en sistemas de aire comprimido	65
Figura 17 Clasificación del aire comprimido según la norma ISO 8573-1:2010	67
Figura 18 Layout optimizado de la red de aire comprimido en planta industrial	71

Figura 19 Simulación de la red de aire comprimido en EPANET.....	74
Figura 20 Nodo de la llenadora en EPANET	75
Figura 21 Nodo de la tapadora a presión en EPANET	75
Figura 22 Nodo de la etiquetadora en EPANET.....	76
Figura 23 Nodo del sistema de limpieza en EPANET.....	76
Figura 24 Nodo de la empacadora final en EPANET.....	77
Figura 25 Nodo del túnel termo encogido en EPANET	77
Figura 26 Nodo de la prensa neumática en EPANET	78
Figura 27 Nodo del compresor de aire en EPANET	78

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Cotización de materiales para la implementación de la red de aire comprimido	94
Anexo 2 Normas y presiones máximas admisibles	95
Anexo 3 Característica de los tipos de compresores	96
Anexo 4 Aprobación de abstract departamento de idiomas	97

UNIVERSIDAD INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**TEMA: DISEÑO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO PARA EQUIPOS
NEUMÁTICOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL**

AUTOR: Luna Marín Luis David

TUTOR: Msc. Sarmiento Ortiz Fabian Alberto

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo se desarrolla a partir de la necesidad de optimizar la red de aire comprimido en una planta de productos lácteos en Machachi, cuyo sistema actual, formado por mangueras improvisadas y un compresor de pistón de 15 HP, presenta caídas de presión, fugas y exceso de condensado que afectan la productividad y aumentan los costos operativos, el objetivo es diseñar una red eficiente que suministre aire seco, constante y con la presión requerida a siete equipos neumáticos, mejorando el rendimiento de la línea de producción, la hipótesis plantea que un rediseño técnico, con el dimensionamiento adecuado de compresor, tanque pulmón, secador, tuberías y accesorios, permitirá reducir fallas, optimizar el consumo energético y prolongar la vida útil de los equipos, la metodología incluyó un diagnóstico de caudal y presión en cada equipo, registro de pérdidas productivas durante ocho semanas, análisis del layout actual y cálculos de dimensionamiento, los resultados determinaron la necesidad de un compresor de 191 CFM a 8–10 bar, un tanque de 2.000 galones, un secador de 250 CFM y tuberías de polipropileno de 63 mm, logrando velocidades de flujo menores a 6 m/s y pérdidas de presión mínimas, con la implementación, se prevé reducir más del 80 % de las horas de inactividad asociadas a fallas neumáticas, incrementar la productividad y asegurar condiciones higiénicas acordes con la industria alimentaria, en conclusión, la propuesta es técnica y económicamente viable, ofreciendo una solución sostenible y rentable para la planta.

Descriptor: aire comprimido, CFM, equipos neumáticos, red industrial, tuberías.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

**FACULTAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION Y LA
COMUNICACION**

CARRERA: INGENIERA INDUSTRIAL

**TEMA: DESIGN OF A COMPRESSED AIR DISTRIBUTION NETWORK FOR
PNEUMATIC EQUIPMENT IN AN INDUSTRIAL PLANT**

AUTHOR: Luna Marín Luis David

TUTOR: Msc. Sarmiento Ortiz Fabian Alberto

ABSTRACT

This work is developed to optimize the compressed air network at a dairy products plant in Machachi. The current system, composed of improvised hoses and a 15 HP piston compressor, experiences pressure drops, leaks, and excess condensate, which affect productivity and increase operating costs. The objective is to design an efficient network that supplies dry air at a constant flow and at the required pressure to seven pneumatic machines, thereby improving the performance of the production line. The hypothesis states that a technical redesign, including the proper sizing of the compressor, receiver tank, dryer, pipelines, and accessories, will reduce failures, optimize energy consumption, and extend the service life of the equipment. The methodology included diagnosing flow and pressure at each machine, recording production losses over 8 weeks, analyzing the current layout, and performing dimensioning calculations. The results determined the need for a 191 CFM compressor at 8–10 bar, a 2,000-gallon receiver tank, a 250 CFM dryer, and 63 mm polypropylene pipelines, achieving flow velocities below 6 m/s and minimal pressure drops. Upon implementation, it is expected to reduce downtime due to pneumatic failures by more than 80%, increase productivity, and ensure hygienic conditions in line with food industry standards. In conclusion, the proposal is technically and economically feasible, offering a sustainable and profitable solution for the plant.

KEYWORDS: Compressed Air, CFM, Pneumatic Equipment, Industrial network, Pipelines.

(Anexo 4

Aprobación de abstract departamento de idiomas)

CAPÍTULO I

Introducción

En la actualidad, la eficiencia energética se ha vuelto una prioridad para las industrias de todo el mundo; esto se debe al aumento continuo de los costos de la energía y a la inevitable necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, los sistemas de aire comprimido, que son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales, constituyen una porción considerable del consumo energético en las plantas industriales. Algunos estudios afirman que “en la actualidad el aire comprimido supone ya más del 20% del consumo energético en las industrias, llegando incluso a ser muy superior en ciertos procesos industriales” (Interempresas, 2017). Estos sistemas pueden volverse ineficientes si no se diseñan y se mantienen de manera adecuada, lo que puede resultar en pérdidas de energía y un aumento en los costos operativos.

El aire comprimido es una de las fuentes de energía más utilizadas en la industria por su versatilidad en diversos procesos; además, no todas las industrias lo usan en la misma parte, por lo tanto, es importante saber en qué clase de industria se utiliza con mayoridad.

En la **Tabla 1** se muestra el porcentaje de plantas industriales que utilizan sistemas de aire comprimido, según los datos del U.S. Department of Energy (2001); se determina que el uso de aire comprimido es alto en sectores como la fabricación de metales primarios (85%), productos de caucho y plástico (75%) y maquinaria industrial y comercial (70%), debido a la alta demanda de energía neumática para operar equipos y procesos automatizados. Los sectores como alimentos y bebidas (65%) y productos químicos (60%) también presentan un uso aceptable; por otro lado, industrias como productos de madera (30%) y muebles (35%) muestran una menor cantidad de utilización; esta tabla evidencia la importancia del aire comprimido como fuente de

energía en diversas herramientas y procesos industriales, y aclara la importancia de diseñar sistemas eficientes.

Tabla 1

Uso de sistemas de aire comprimido por sector industrial

Sector Industrial (SIC)	Porcentaje de plantas que utilizan aire comprimido
Fabricación de metales primarios	85%
Productos de caucho y plástico	75%
Maquinaria industrial y comercial	70%
Alimentos y bebidas	65%
Productos químicos	60%
Textiles	50%
Papel y productos de papel	45%
Impresión y publicaciones	40%
Muebles y productos relacionados	35%
Productos de madera	30%

Nota. Datos adaptados de U.S. Department of Energy (2001). Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services.

En Latinoamérica, y particularmente en Ecuador, diversas industrias se enfrentan a retos significativos en cuanto a la eficiencia de los sistemas de aire comprimido, entre los factores que

inciden en el rendimiento de estos sistemas destacan la falta de un mantenimiento adecuado, la utilización de equipos obsoletos y un diseño ineficiente de las redes de distribución.

El artículo de la revista *El Mueble y la Madera* (2021) señala que:

Las pérdidas en los sistemas de aire comprimido pueden representar hasta un 30%, y en casos extremos, hasta el 50% de la producción de aire en una empresa, pero si una planta realiza un mantenimiento adecuado del sistema y controles periódicos en la red, las pérdidas no sobrepasan el 10% de la producción de los compresores. (M&M, párr.2)

Esto pone de manifiesto la importancia de adoptar medidas que optimicen el uso de la energía en los sistemas de aire comprimido, lo cual contribuirá a mejorar la competitividad y sostenibilidad de las empresas en la región.

En el caso específico de la planta industrial en estudio, se ha detectado que la red de aire comprimido presenta varias deficiencias en términos de presión, distribución y eficiencia energética, estas ineficiencias no solo conllevan pérdidas económicas, sino que también afectan la productividad y generan un consumo eléctrico innecesario; por lo tanto, es fundamental llevar a cabo un diseño adecuado de la red de aire comprimido que cumpla las necesidades reales de los equipos neumáticos, el dimensionamiento correcto de tuberías y compresor, con el objetivo de minimizar las pérdidas y maximizar la eficiencia operativa del sistema.

Antecedentes

La planta industrial que se considera en este estudio, es una empresa dedicada a la elaboración de productos lácteos, se encuentra en la parroquia de Machachi, en la provincia de Pichincha, Ecuador; su procedimiento se lleva a cabo en un espacio de aproximadamente 430 metros cuadrados, donde se procesan, envasan y empaquetan productos como leche pasteurizada,

yogur, queso fresco y mantequilla, en las líneas de producción, la empresa tiene equipos neumáticos que dependen de un suministro constante de aire comprimido para llevar a cabo los diferentes procesos como, limpieza, abrir y cerrar válvulas automáticas, operación de cilindros neumáticos y el transporte de los productos.

La planta cuenta con siete máquinas neumáticas principales, entre ellas:

- Llenadora automática de leche.
- Túnel de termo encogido para empaques.
- Prensa neumática para queso.
- Sistema de limpieza con boquillas de aire.
- Etiquetadora neumática.
- Máquina de tapado a presión.
- Empacadora final con actuadores neumáticos.

El sistema de aire comprimido en esta planta se basa exclusivamente en una red improvisada de mangueras de poliuretano, conectadas de manera directa a un compresor de pistón de 15 HP, sin un diseño técnico; esta situación ha prolongado a generar serias deficiencias en las mangueras presentan fugas visibles, conexiones deterioradas y varios tramos tienen mangueras rotas, lo que resulta en pérdidas de presión significativas a lo largo de toda la línea.

Específicamente, se ha observado que las máquinas más alejadas del compresor, como la empacadora final y el túnel de termo encogido, no reciben la presión adecuada para su funcionamiento, lo cual ocasiona fallas frecuentes y pérdida de productividad; el aire comprimido presenta un exceso de condensado, ya que el sistema no cuenta con trampas de condensados, filtros, elementos coalescentes, secador de aire, entre otros. Esto provoca que los

cilindros neumáticos y las válvulas acumulen condensando, generando fallos en sus elementos internos, este problema ha impactado negativamente en la precisión del llenado, la velocidad de empaque y la eficiencia general de la línea.

En la empresa se observó que el sistema de aire comprimido no solo limita la capacidad operativa de las máquinas mencionadas, sino que también genera costos adicionales por mantenimiento correctivo y presenta un riesgo para la salud, debido a la posible presencia de agua en procesos que exigen una higiene rigurosa. En este caso resulta primordial desarrollar un diseño técnico para la red de aire comprimido que asegure un suministro adecuado, seco y constante, con una presión adecuada y condiciones óptimas para el funcionamiento de los equipos neumáticos.

En su análisis según Beko Technologies (2025) explica:

El aire comprimido en la industria alimentaria se utiliza en procesos como la mezcla, la pulverización, el corte, la limpieza, el llenado, el transporte y el envasado. Durante estas etapas de producción, hay tanto contacto directo como indirecto entre el aire comprimido y el producto, esto lo convierte en una fuente potencial de contaminación que es preciso controlar. La calidad del aire comprimido tiene un impacto directo en la seguridad del producto final, por lo que debe cumplir con estándares exigentes como los definidos en la norma ISO 8573. (párr. 1)

Justificación

El presente trabajo de investigación es **importante** porque prioriza un recurso muy indispensable para las plantas industriales en sus procesos que es el aire comprimido. El correcto diseño, distribución y presión adecuada incide directamente en la eficiencia operativa de los equipos neumáticos, a su vez influye en la calidad del producto y minimiza fallas en las líneas de producción, al momento de rediseñar la red de aire comprimido en la industria nos permite corregir fallas actuales que producen una deficiencia en la línea, prevenir interrupciones que no están planificadas y mejorar el rendimiento general de la operación.

El **impacto** de este trabajo se manifiesta, sobre todo, en el ámbito empresarial y productivo, en el contexto empresarial, la optimización del sistema neumático permitirá disminuir los costos de mantenimiento correctivo y el consumo de energía, lo que se traduce en una mayor rentabilidad, en el ámbito laboral, los operarios podrán trabajar con equipos más confiables y seguros; desde una perspectiva científica, este estudio aporta criterios técnicos que favorecen el diseño eficiente de redes neumáticas, en términos ambientales, contribuye a reducir el desperdicio energético y la emisión indirecta de carbono asociada al uso excesivo de compresores.

Este trabajo de investigación es de gran **utilidad** para la evaluación y diseño de sistemas de distribución de aire comprimido en aplicaciones industriales, actuará como una referencia útil para futuros proyectos de mantenimiento preventivo, optimización de recursos y modernización de sistemas neumáticos; su implementación práctica facilitará la prolongación de la vida útil de los equipos, disminuirá las paradas por fallos y asegurará el cumplimiento de los estándares de calidad en la producción.

Los principales **beneficiarios** de este trabajo de investigación serán la empresa y sus colaboradores, la empresa observara una operación más eficiente, lo que implica una reducción de costos y una mejor planificación en el mantenimiento, los empleados que trabajan en el área operativa podrán utilizar equipos más eficientes y seguros, lo que no solo mejorará su rendimiento, sino que también incrementará su eficiencia laboral, los clientes podrán disfrutar de un producto final que se caracteriza por una calidad más alta, este trabajo servirá como material de estudio para aquellos estudiantes de ingeniería que deseen explorar las aplicaciones prácticas de la neumática.

El desarrollo del estudio es completamente **factible** tanto desde el ámbito técnico como científico; desde una perspectiva técnica, contamos con herramientas y normativas que facilitan la evaluación de caídas de presión, el dimensionamiento de redes y la simulación de flujos, lo que nos permite identificar soluciones óptimas, en el plano científico, el trabajo se basa en principios de mecánica de fluidos y en una bibliografía técnica confiable relacionada con sistemas neumáticos. Asimismo, la disponibilidad de datos reales y el acceso a la planta de producción respaldan la viabilidad del diseño propuesto.

Objetivo general

Diseñar una red de aire comprimido para equipos neumáticos de una planta industrial, mediante el levantamiento de la carga instalada, mejorando la línea de abastecimiento.

Objetivos específicos

- Determinar las condiciones actuales del sistema de aire comprimido de la planta industrial mediante la recolección y análisis de datos técnicos sobre caudal, presión y distribución, con el fin de identificar las deficiencias que afectan el funcionamiento de los equipos neumáticos.

- Determinar las condiciones de diseños, mediante herramientas técnicas de cálculo, para asegurar un suministro de aire constante y adecuado a cada equipo.
- Realizar el dimensionamiento y distribución del sistema de aire comprimido, mediante criterios y herramientas de ingeniería, para contribuir con la mejora del abastecimiento.

CAPÍTULO II

Ingeniería del Proyecto

Diagnóstico Actual de la Empresa

El desarrollo de este proyecto nace en la necesidad de corregir aquellas fallas identificadas en el sistema de aire comprimido actual, que disponen en la planta de productos lácteos situada en Machachi; el sistema actualmente presenta diferentes deficiencias, caídas de presión constante, condensado en las diferentes líneas de aire, fugas considerables y una distribución deficiente, esto impacta negativamente en las diferentes operaciones de los equipos neumáticos, y a su vez en la productividad de la planta. Debido a este problema se propone diseñar una red de aire comprimido, con un respectivo análisis y criterios técnicos que garantice y prolongue la vida útil de los equipos neumáticos.

La planta de lácteos cuenta con 7 máquinas neumáticas para sus procesos:

- Llenadora automática de leche.
- Túnel de termo encogido para empaques.
- Prensa neumática para queso.
- Sistema de limpieza con boquillas de aire.
- Etiquetadora neumática.
- Máquina de tapado a presión.
- Empacadora final con actuadores neumáticos.

El proceso productivo de la planta se desarrolla mediante operaciones neumáticas que garantizan la eficiencia y calidad del producto final, inicialmente el producto líquido es dosificado en sus respectivos envases a través de la llenadora automática de leche, equipo que asegura precisión en el volumen y velocidad en la operación, después los envases pasan a la

máquina de tapado a presión, donde se colocan las tapas mediante un sistema neumático que garantiza un cierre hermético, enseguida los productos son dirigidos hacia la etiquetadora neumática, la cual aplica las etiquetas de identificación correspondientes, se realiza una limpieza superficial a través del sistema de limpieza con boquillas de aire, el cual remueve residuos de polvo o humedad que puedan haberse adherido durante las etapas previas.

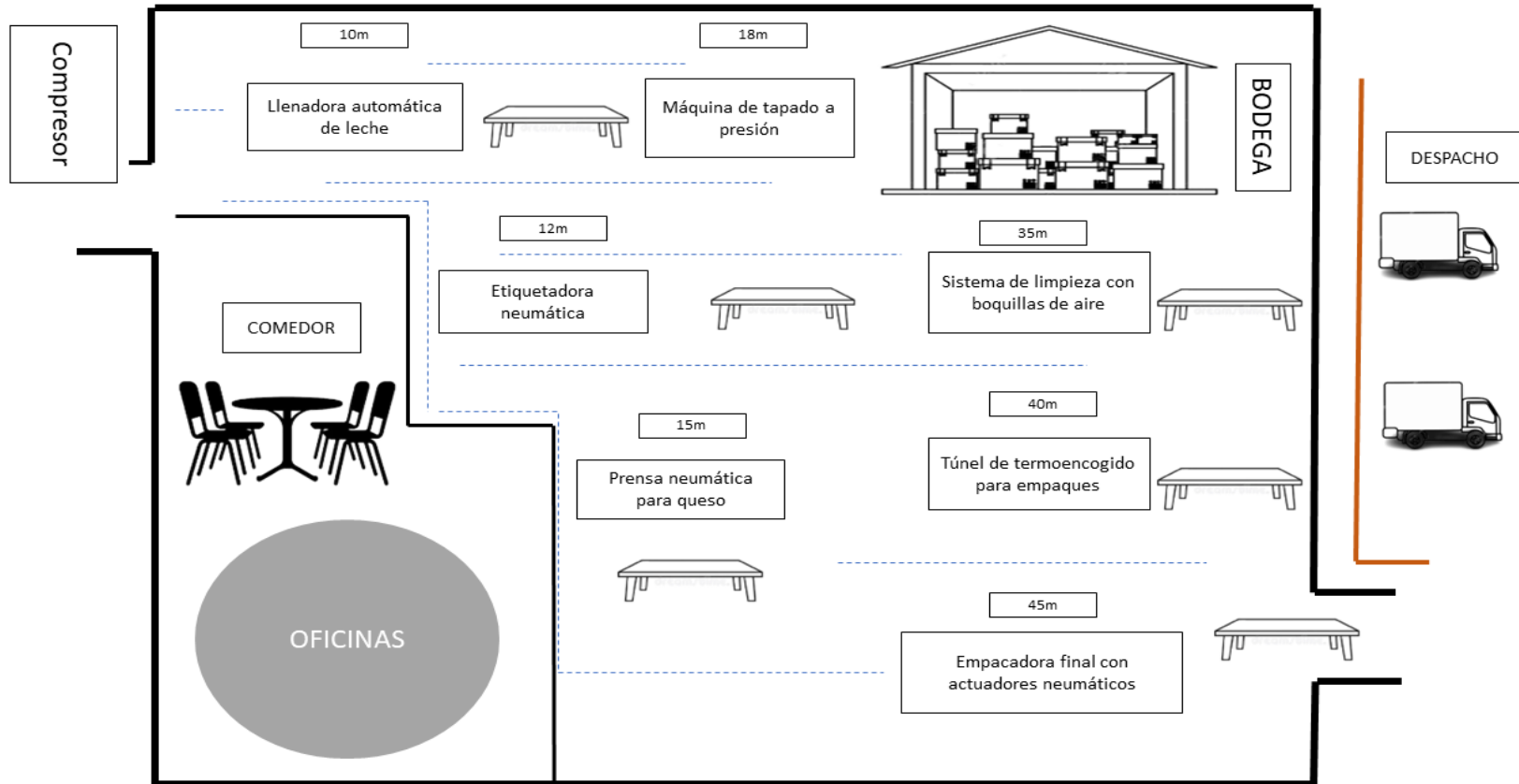
En paralelo, para productos como el queso se utiliza una prensa neumática que permite moldear y compactar el producto antes de su empaque, los productos envasados son agrupados y trasladados al túnel de termo encogido para empaques, donde se aplica calor generando un ajuste compacto y seguro, finalmente el proceso concluye en la empacadora final con actuadores neumáticos, encargada de organizar, sellar y disponer los productos listos para su distribución.

Para iniciar la propuesta de rediseño del sistema de aire comprimido, es necesario realizar un levantamiento del layout actual de la planta industrial, esto nos permite comprender de manera precisa cómo están distribuidos los equipos neumáticos dentro del área de trabajo, así como el recorrido que actualmente sigue la red de mangueras desde el compresor hasta cada punto de consumo; el análisis del layout nos facilita la identificación de distancias entre equipos y el compresor y también donde se presentan deficiencias operativas, como caídas de presión y distribución desigual del caudal, esta información es fundamental para proponer un diseño más eficiente, que reduzca las pérdidas de energía y garantice el correcto funcionamiento de todos los equipos, el levantamiento se realizó considerando las condiciones reales de operación, dimensiones físicas de la planta y la disposición actual del sistema neumático, sirviendo como base técnica para el desarrollo del nuevo diseño.

En la **Figura 1** presentamos el layout actual donde se ve una distribución poco funcional del sistema neumático, las conexiones desde el compresor hacia los equipos se realizan mediante mangueras (representadas por líneas azules entrecortadas), que se encuentran sobre el suelo, generando riesgos operativos y pérdida de eficiencia, la ubicación desordenada de los equipos incrementa la longitud de las conexiones y ocasionan caídas de presión, afectando el rendimiento; esto indica la necesidad de un rediseño que optimice tanto la disposición de las máquinas como la red de aire comprimido.

Figura 1

Layout actual de la empresa de lácteos



Nota. Representación del diseño actual del layout de la planta industrial con ubicación de los equipos neumáticos.

Diagnóstico Técnico de Presión y Caudal en Equipos Neumáticos de la Planta Láctea

La planta de lácteos cuenta actualmente con un compresor de pistón de 15 hp, cada máquina cuenta con un caudal (CFM) y una presión (PSI - BAR) mínima establecida por los fabricantes, con el objetivo de identificar las falencias del sistema de aire comprimido se desarrolló un levantamiento técnico que informa la medición del caudal y la presión en los equipos neumáticos; para ello se ocupó los diferentes Instrumentos, presostato digital y caudalímetro.

La ficha técnica de CS Instruments (2025) señala que:

Para la medición del caudal de aire comprimido en los equipos neumáticos, se utilizó el caudalímetro VA 500 de CS Instruments, el cual opera bajo el principio de flujo másico térmico. Este dispositivo permite una instalación sencilla bajo presión y proporciona una alta precisión en la medición del caudal volumétrico estándar, con una exactitud de $\pm 1.5\%$ del valor medido y $\pm 0.3\%$ del valor final. (p.82)

La presión en los distintos puntos de consumo fue registrada mediante el presostato digital de la serie DPS de AirTAC, “ofrece una visualización digital de la presión y una precisión de $\pm 2\%$ del valor total, siendo adecuado para aplicaciones con gases no corrosivos en rangos de presión de hasta 10 bar” (AirTAC, 2025).

En la **Tabla 2** se presenta un diagnóstico del comportamiento de presión en distintos equipos neumáticos, en cada equipo se hizo un levantamiento considerando su distancia al compresor, la presión operativa requerida para un funcionamiento eficiente y la presión real medida en condiciones actuales; aquí se puede identificar una tendencia clara, los equipos más distantes del compresor presentan caídas de presión más pronunciadas, como por ejemplo, el

túnel de termo encogido y el sistema de limpieza con boquillas, ubicados a más de 35 metros donde indican presiones reales considerablemente por debajo de lo requerido, lo que los coloca en un estado operativo de baja presión, esta situación se repite en el empacador final, con una caída de 2 bar respecto a su requerimiento, los equipos ubicados a menor distancia, como la llenadora automática o la prensa para queso, operan de manera estable, evidenciando que la pérdida de presión es proporcional al recorrido del aire comprimido.

Tabla 2*Diagnóstico de presión en equipos neumáticos*

Equipo Neumático	Distancia al Compresor (m)	Presión Requerida Real (bar)	Presión Medida (bar)	Instrumento de Presión	Estado Operativo
Llenadora automática de leche	10	6	5,6	Presostato digital	Estable
Túnel de termo encogido para empaques	40	6,5	4,7	Presostato digital	Baja presión
Prensa neumática para queso	15	7	6,3	Presostato digital	Estable
Sistema de limpieza con boquillas de aire	35	5,5	4,2	Presostato digital	Baja presión
Etiquetadora neumática	12	5	4,5	Presostato digital	Baja presión
Máquina de tapado a presión	18	6,5	6	Presostato digital	Estable
Empacadora final con actuadores neumáticos	45	7	5	Presostato digital	Baja presión

Nota. Medición de presión en condiciones reales mediante presostato digital AirTAC DPS. Se incluye distancia al compresor y estado operativo del equipo.

En la **Tabla 3** corresponde a la comparación entre el caudal de aire comprimido que necesita cada equipo neumático para funcionar correctamente y el caudal que realmente está recibiendo en las condiciones actuales, los equipos analizados se observa una disminución del

caudal entregado respecto al valor requerido, lo cual indica una deficiencia en el suministro de aire comprimido a lo largo de la red, este déficit es más notorio en equipos como el túnel de termo encogido, la prensa neumática para queso y el sistema de limpieza con boquillas, los cuales muestran diferencias marcadas entre el caudal esperado y el medido, incluso en equipos que operan relativamente cerca del compresor, como la llenadora automática de leche o el empacador final, se evidencian valores por debajo de lo necesario, lo que puede generar pérdidas de eficiencia, paradas intermitentes y una mayor exigencia sobre el sistema neumático en general.

Tabla 3

Diagnóstico de caudal en equipos neumáticos

Equipo Neumático	Caudal Requerido (L/min)	Caudal Medido (L/min)	Método de Medición del Caudal
Llenadora automática de leche	850	753	Caudalímetro de área variable
Túnel de termo encogido para empaques	500	383	Caudalímetro de área variable
Prensa neumática para queso	720	545	Caudalímetro de área variable
Sistema de limpieza con boquillas de aire	400	343	Caudalímetro de área variable
Etiquetadora neumática	300	262	Caudalímetro de área variable
Máquina de tapado a presión	600	521	Caudalímetro de área variable
Empacadora final con actuadores neumáticos	900	765	Caudalímetro de área variable

Nota. Evaluación del caudal requerido, medido mediante caudalímetro VA 500 de CS

Instruments.

Evaluación Semanal de Pérdidas de Producción Asociadas a Deficiencias Neumáticas

Con el afán de evidenciar el impacto que tiene el sistema actual de aire comprimido en la eficiencia productiva de la planta, se elaboró una tabla de seguimiento semanal que detalla la relación entre la planificación de producción y los resultados reales obtenidos durante ocho semanas consecutivas, esta información se recopiló en base a observaciones técnicas y registros internos, permitiendo identificar con claridad las pérdidas atribuibles a las fallas del sistema neumático; el análisis presentado de estos datos permite dimensionar de forma cuantitativa el efecto que tienen las variaciones de presión y caudal en la operación de los equipos neumáticos, lo cual respalda la necesidad de rediseñar la red de aire comprimido para mejorar su desempeño.

La tabla se encuentra organizada de la siguiente manera:

- **Semana:** Indica el número de la semana del análisis, abarcando un total de ocho semanas consecutivas.
- **Día:** Corresponde al día específico dentro de cada semana laboral (de lunes a sábado).
- **Unidades Planificadas:** Representa la cantidad de productos que se tenía previsto fabricar en cada jornada según la planificación operativa.
- **Unidades Producidas:** Muestra el número real de unidades que se lograron producir efectivamente al cierre del día.
- **Pérdida por Fallas del Aire:** Corresponde a la diferencia entre lo planificado y lo producido, atribuida directamente a interrupciones o deficiencias relacionadas con el suministro de aire comprimido.
- **Horas Perdidas (estimadas):** Indica el tiempo que se estima que se perdió por los problemas en la red neumática, calculado a partir del análisis de cada jornada.

En la **Tabla 4** podemos visualizar que en la primera semana se planificaron 7.100 unidades, pero únicamente se produjeron 6.678, lo que refleja una pérdida total de 422 unidades atribuibles a fallas en la red de aire comprimido; las jornadas más críticas fueron el jueves y viernes, con pérdidas de 71 y 82 unidades respectivamente. En términos operativos, estas pérdidas representaron un total de 4,2 horas de inactividad, que afectaron especialmente a los procesos de envasado y termoencogido.

Tabla 4

Semana 1 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1200	1136	64	0,6
Martes	1200	1135	65	0,7
Miércoles	1200	1121	79	0,8
Jueves	1200	1129	71	0,7
Viernes	1200	1118	82	0,8
Sábado	1100	1039	61	0,6

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 1 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 5** podemos visualizar que en esta semana se planificaron 7.400 unidades, de las cuales se produjeron 6.903, registrando una pérdida total de 497 unidades, el día con mayor afectación fue el miércoles, con 110 unidades no producidas; el tiempo total estimado de inactividad atribuible a fallas en el sistema de aire comprimido fue de 4,9 horas.

Tabla 5

Semana 2 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1250	1161	89	0,9
Martes	1250	1162	88	0,9
Miércoles	1250	1140	110	1,1
Jueves	1250	1156	94	0,9
Viernes	1250	1186	64	0,6
Sábado	1150	1098	52	0,5

Nota Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 2 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 6** se muestran los datos de la semana 3, se planificaron 6.950 unidades, de las cuales se produjeron 6.527, registrando una pérdida total de 423 unidades, el día con mayor afectación fue el jueves, con 96 unidades no producidas, el tiempo total estimado de inactividad por

problemas neumáticos fue de 4,2 horas, los errores en la línea de aire afectaron el rendimiento de los equipos neumáticos.

Tabla 6

Semana 3 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1180	1095	85	0,8
Martes	1180	1130	50	0,5
Miércoles	1180	1118	62	0,6
Jueves	1180	1084	96	1
Viernes	1180	1119	61	0,6
Sábado	1050	981	69	0,7

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 3 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 7** se muestra los datos de la semana 4, se planificaron 7.700 unidades, de las cuales se produjeron 7.231, registrando una pérdida total de 469 unidades, el martes fue el día más afectado con 118 unidades perdidas; el total de horas no productivas fue de 4,7.

Tabla 7*Semana 4 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido*

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1300	1238	62	0,6
Martes	1300	1182	118	1,2
Miércoles	1300	1223	77	0,8
Jueves	1300	1247	53	0,5
Viernes	1300	1249	51	0,5
Sábado	1200	1092	108	1,1

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 4 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 8** se muestra los datos de la semana 5, planificaron 7.220 unidades, de las cuales se produjeron 6.653, registrando una pérdida total de 567 unidades, el viernes presentó la mayor pérdida individual con 118 unidades no producidas; las horas perdidas alcanzaron las 5,7, lo que indica que el sistema neumático continúa presentando deficiencias de presión y caudal.

Tabla 8

Semana 5 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1220	1104	116	1,2
Martes	1220	1142	78	0,8
Miércoles	1220	1125	95	0,9
Jueves	1220	1143	77	0,8
Viernes	1220	1102	118	1,2
Sábado	1120	1037	83	0,8

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 5 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 9** se muestra los datos de la semana 6, planificaron 7.520 unidades, de las cuales se produjeron 7.115, registrando una pérdida total de 405 unidades, el día más crítico fue el jueves con 111 unidades no procesadas, el tiempo estimado de inactividad fue de 4,0 horas, la falla estuvo relacionada con caídas de presión intermitentes en la zona de empaquetado.

Tabla 9

Semana 6 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1270	1207	63	0,6
Martes	1270	1218	52	0,5
Miércoles	1270	1215	55	0,6
Jueves	1270	1159	111	1,1
Viernes	1270	1196	74	0,7
Sábado	1170	1120	50	0,5

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 6 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 10** se muestra los datos de la semana 7, planificaron 7.340 unidades, de las cuales se produjeron 6.828, registrando una pérdida total de 512 unidades, el viernes fue el día más afectado con 107 unidades no producidas, se estimaron 5,2 horas de tiempo improductivo, se recomienda evaluar el estado de las conexiones y válvulas en los tramos finales de la línea neumática.

Tabla 10

Semana 7 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1240	1147	93	0,9
Martes	1240	1183	57	0,6
Miércoles	1240	1184	56	0,6
Jueves	1240	1134	106	1,1
Viernes	1240	1133	107	1,1
Sábado	1140	1047	93	0,9

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 7 correspondiente al período de análisis técnico.

En la **Tabla 11** se muestra los datos de la semana 8, planificaron 7.040 unidades, de las cuales se produjeron 6.588, registrando una pérdida total de 452 unidades, el viernes registró nuevamente la mayor pérdida con 105 unidades, las fallas provocaron 4,5 horas de inactividad, afectando directamente a las estaciones de prensado y sellado.

Tabla 11*Semana 8 Registro de producción y pérdidas por fallas del aire comprimido*

Día	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Pérdida por Fallas del Aire	Horas Perdidas (estimadas)
Lunes	1190	1095	95	0,9
Martes	1190	1128	62	0,6
Miércoles	1190	1125	65	0,7
Jueves	1190	1126	64	0,6
Viernes	1190	1085	105	1,1
Sábado	1090	1029	61	0,6

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos, semana 8 correspondiente al período de análisis técnico.

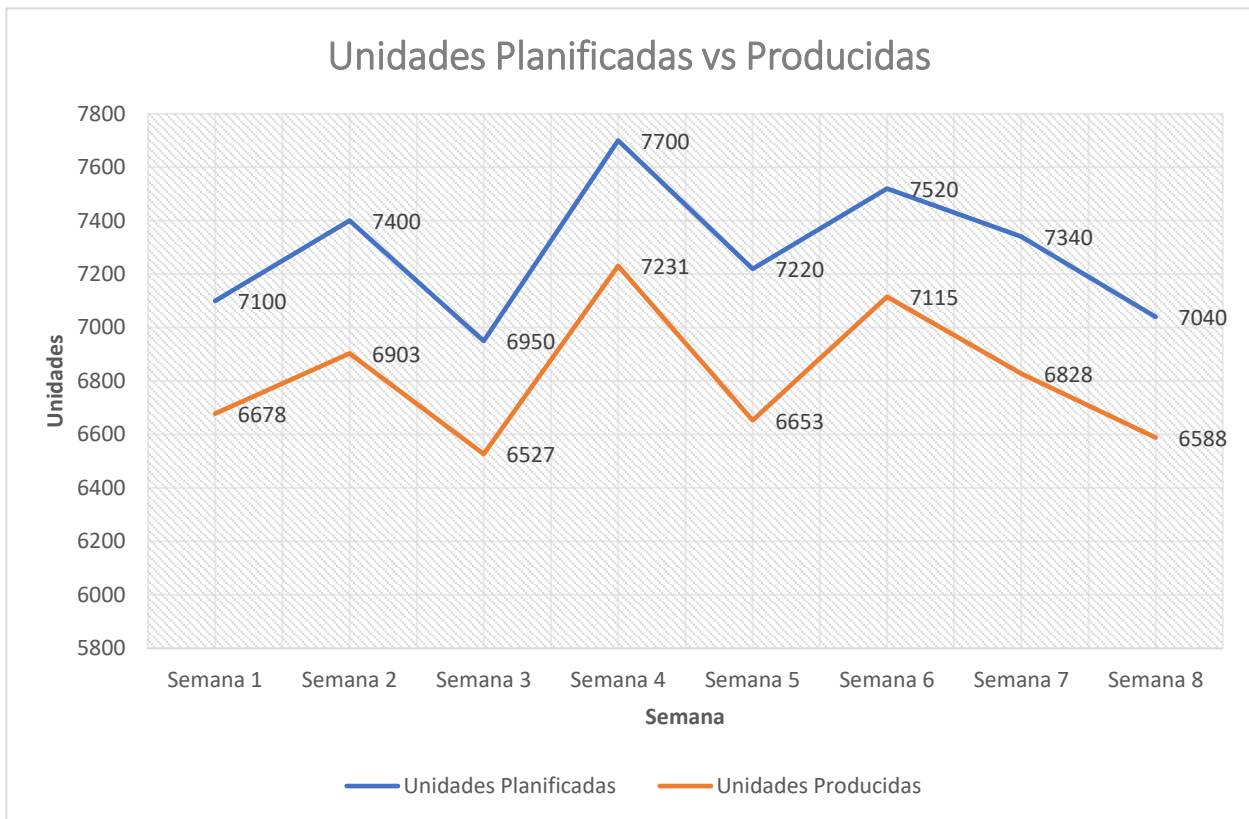
Para mostrar con claridad el comportamiento de la producción y el efecto de las averías en el sistema de aire comprimido, se crearon dos gráficos comparativos basados en los datos recolectados durante ocho semanas seguidas, esta representación visual permite analizar la eficiencia operativa de la planta, identificar errores entre lo planificado y lo producido, y cuantificar las consecuencias en términos de pérdida de unidades y tiempo inactivo.

En la **Figura 2** se grafica la comparación de semana a semana, el total de unidades que fueron planificadas en paralelo a las que realmente se lograron producir, la diferencia entre ambas líneas representa el volumen de unidades no fabricadas debido a las deficiencias en la

línea de aire comprimido, se puede visualizar que a pesar de mantener metas operativas estables, la producción efectiva fue inferior, este análisis pone en evidencia que la línea neumática actual no está garantizando un suministro constante y suficiente para el funcionamiento óptimo de los equipos neumáticos, afectando directamente el cumplimiento de la planificación productiva.

Figura 2

Unidades planificadas vs. producidas

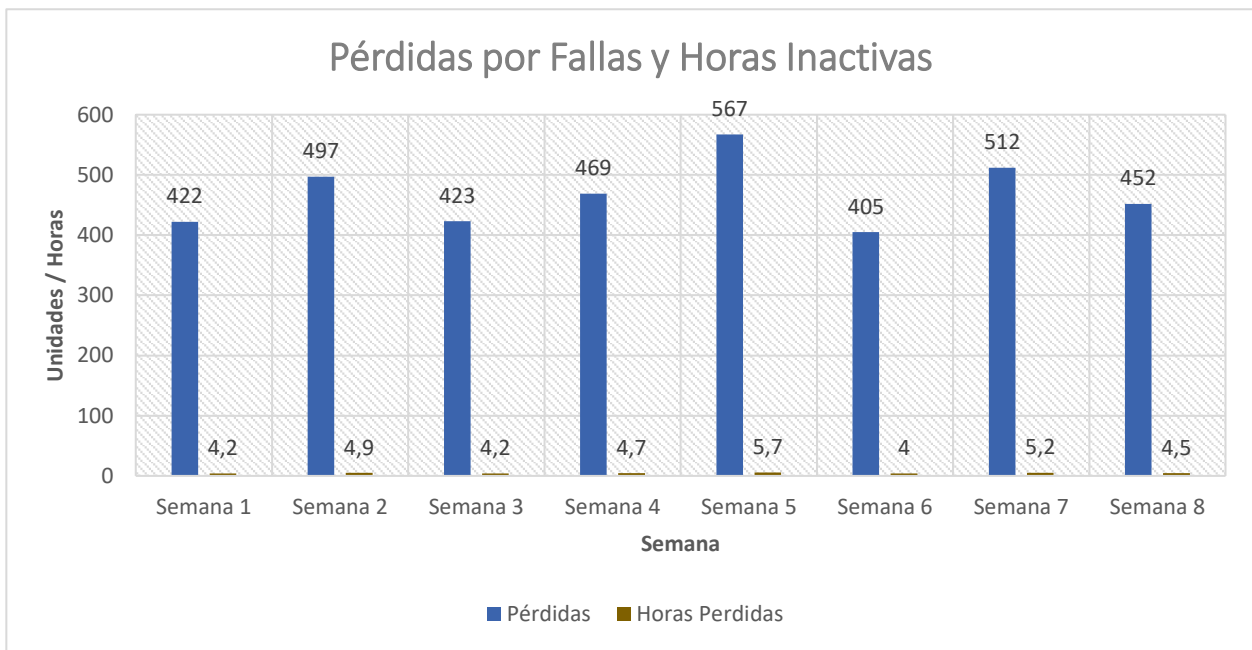


Nota. Elaboración propia. El gráfico compara la cantidad de unidades planificadas con las unidades efectivamente producidas durante ocho semanas, la diferencia entre ambas refleja el impacto de las deficiencias del sistema de aire comprimido sobre el cumplimiento de la planificación operativa.

En la **Figura 3** se muestran por separado las unidades perdidas cada semana a causa de las fallas en la línea de aire comprimido y las horas de inactividad técnica estimadas; las barras reflejan la magnitud de la pérdida productiva en dos dimensiones: volumen (unidades no producidas) y tiempo (horas improductivas); se observa que en semanas como la 5 y la 7 las pérdidas alcanzan niveles significativos, superando las 500 unidades y generando más de 5 horas de paralización. Esta información cuantifica con precisión el impacto que tiene una línea neumática deficiente sobre la productividad global de la planta.

Figura 3

Pérdidas por falla y Horas inactivas



Nota. Elaboración propia. El gráfico muestra las unidades perdidas y las horas de inactividad estimadas por semana, debido a interrupciones causadas por fallas en la línea de aire comprimido.

Con los datos recopilados durante 8 semanas, se determinó que la planta de lácteos mantiene una planificación de producción que supera las 7.000 Ud./semanales, considerando que el ritmo promedio de fabricación es de 100 unidades por hora, se concluye que la carga laboral efectiva por semana se encuentra entre 69 y 77 horas de operación, este dato confirma que la jornada productiva real supera una jornada estándar de 8 horas diarias, lo que implica una alta exigencia sobre la línea de aire comprimido y los equipos neumáticos.

Al comparar las unidades producidas con las planificadas, se evidenció una pérdida acumulada significativa, que también se refleja en tiempo improductivo, como por ejemplo, en la semana 5 se registraron 5,7 horas de inactividad atribuible a fallas en el sistema neumático, lo que representa casi una jornada completa perdida; estos resultados permiten cuantificar con mayor precisión el impacto técnico - operativo de las deficiencias en la línea de aire comprimido y justifican la necesidad de su rediseño para garantizar un suministro eficiente y constante que acompañe el nivel de exigencia de la planta.

Identificación y Priorización de Causas mediante Herramientas de Análisis de Calidad

Con el fin de identificar las causas que generan las principales pérdidas de productividad asociadas al sistema de aire comprimido, se aplicaron herramientas de análisis de calidad que permiten clasificar y priorizar los factores críticos que afectan la eficiencia operativa.

En primer lugar, se utilizó el Diagrama de Pareto, con el objetivo de determinar cuáles causas representan la mayor proporción de los efectos observados, luego las causas más significativas fueron analizadas y organizadas mediante el Diagrama de Ishikawa, a fin de establecer las causas raíz y orientar las acciones correctivas dentro del modelo operativo propuesto.

Diagrama de Pareto

Con el objetivo de identificar las principales causas que generan pérdidas de productividad en la planta, se analizaron los registros semanales de unidades planificadas, producidas y perdidas por fallas del sistema de aire comprimido; a partir de esta información se elaboró un Diagrama de Pareto, que permite priorizar las causas que concentran la mayor proporción de las pérdidas y orientar los esfuerzos hacia aquellas que tienen un mayor impacto en la operatividad del sistema de aire.

En la **Tabla 12** se muestra el resumen de las principales causas que originan pérdidas de producción debido a fallas en el sistema de aire comprimido. Se observa que las fugas en la red y las caídas de presión representan la mayor cantidad de unidades perdidas, seguidas por las fugas en conexiones terminales y el mantenimiento preventivo deficiente. Estas tres causas, junto con el condensado en las líneas y el compresor ineficiente, concentran aproximadamente el 80 % de las pérdidas totales. Esto evidencia que los problemas más relevantes están asociados a deficiencias técnicas del sistema neumático y a la falta de mantenimiento adecuado, afectando directamente la eficiencia y continuidad del proceso productivo.

Tabla 12*Causas y porcentaje de pérdidas en la producción por deficiencias neumáticas*

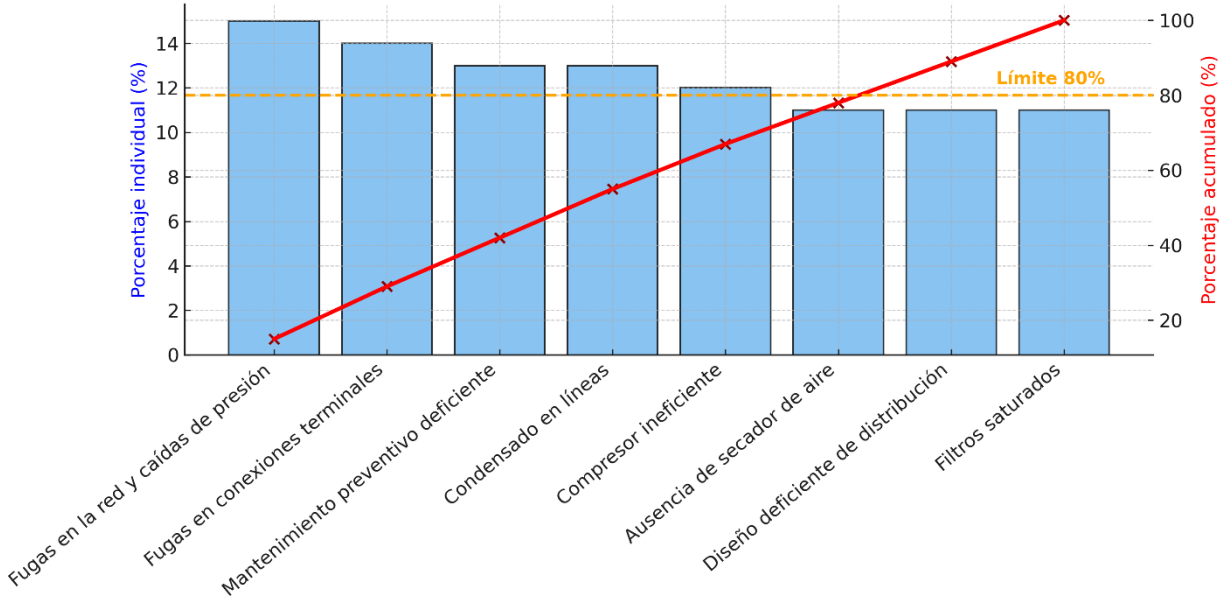
CAUSA	UNIDADES PERDIDAS	Porcentaje	P. Acumulado
Fugas en la red y caídas de presión	567	15%	15%
Fugas en conexiones terminales	512	14%	29%
Mantenimiento preventivo deficiente	497	13%	42%
Condensado en líneas	469	13%	55%
Compresor ineficiente	452	12%	67%
Ausencia de secador de aire	423	11%	78%
Diseño deficiente de distribución	422	11%	89%
Filtros saturados	405	11%	100%
Total	3747		

Nota. Elaboración propia con base en los registros semanales de producción. La tabla resume las principales causas de pérdida en la planta por fallas del sistema de aire comprimido.

En la **Figura 4** se representa el Diagrama de Pareto, elaborado a partir de los datos de la **Tabla 12**; el gráfico permite observar que las causas más relevantes de pérdida corresponden a las fugas en la red y caídas de presión, seguidas por el mantenimiento preventivo deficiente, el condensado en las líneas y el compresor ineficiente; estas causas concentran aproximadamente el 80 % de las pérdidas totales, evidenciando que los problemas principales se relacionan con deficiencias técnicas y de mantenimiento en el sistema neumático.

Figura 4

Diagrama de Pareto – Pérdidas por fallas en el sistema de aire comprimido



Nota. Elaboración propia con base en los registros semanales de producción; el diagrama prioriza las causas que concentran el 80 % de las pérdidas productivas.

Diagrama de Ishikawa (causa-efecto)

Procediendo del análisis del Diagrama de Pareto, se elaboró el Diagrama de Ishikawa con el fin de identificar las causas raíz que provocan las pérdidas productivas en el sistema de aire comprimido; este diagrama permite visualizar de forma estructurada los factores técnicos y operativos que inciden en la ineficiencia del sistema, destacando problemas relacionados con el compresor, la falta de mantenimiento, el uso de materiales inadecuados y la ausencia de control de presión y caudal; los resultados obtenidos sirven de base para definir las acciones del modelo operativo propuesto.

A continuación, en la **Figura 5**, se presenta un diagrama de causa-efecto que permite identificar y clasificar de forma estructurada las causas que provocan la baja productividad observada en la planta. Este diagrama conocido como diagrama de Ishikawa, agrupa las causas en seis categorías principales: mano de obra, método, máquina, medio ambiente, medición y material, la visualización facilita el análisis integral del problema y sustenta la necesidad de un diseño en el sistema de distribución de aire comprimido.

Figura 5

Diagrama de Ishikawa - Baja productividad por fallas en el sistema de aire comprimido



Nota. Nota. Elaboración propia con base en las causas priorizadas del Diagrama de Pareto. El diagrama muestra las causas raíz que originan las deficiencias del sistema de aire comprimido y que sirven de base para el modelo operativo propuesto.

Los resultados del Diagrama de Ishikawa confirman las causas priorizadas en el Diagrama de Pareto, evidenciando que las pérdidas productivas se originan principalmente por fugas de aire, mantenimiento deficiente, condensado en las líneas y baja eficiencia del compresor; estas causas raíz permitieron establecer una relación directa con las etapas del modelo operativo propuesto, orientando las acciones hacia el diseño técnico de la red, la mejora en los procedimientos de mantenimiento, la incorporación de sistemas de medición y control, y la capacitación del personal para garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible del sistema de aire comprimido.

Área de estudio

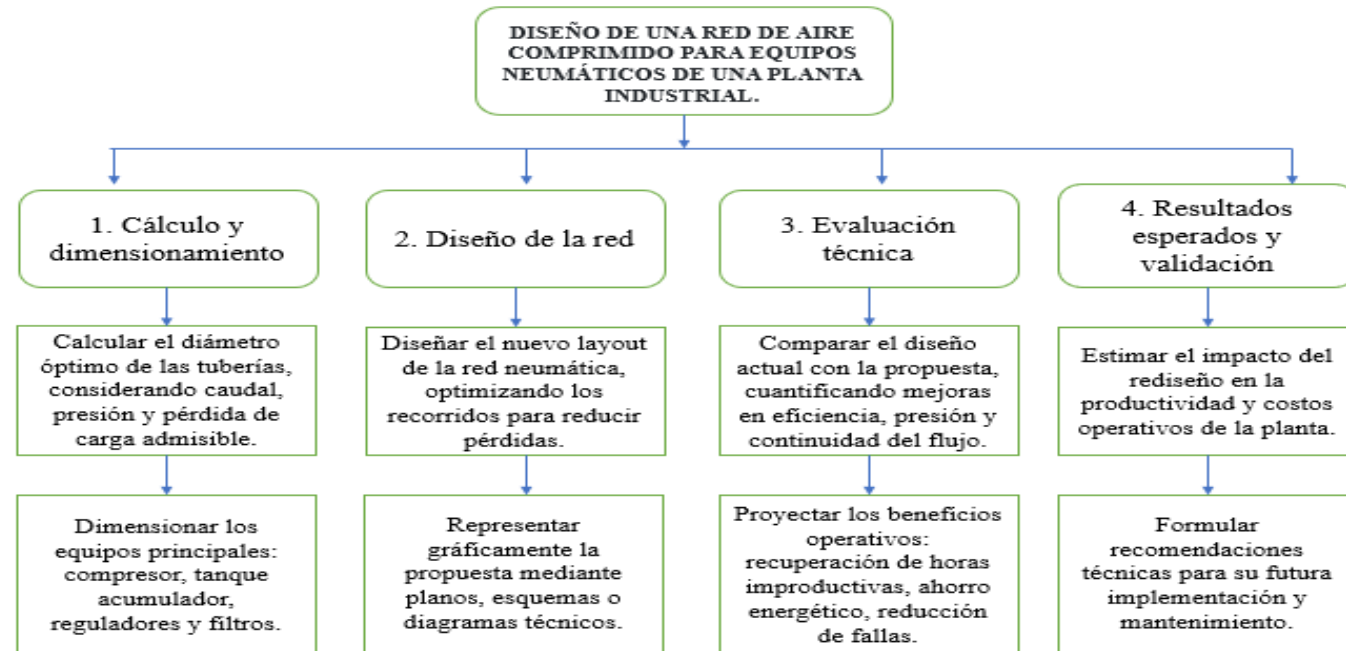
Dominio:	Tecnología y Sociedad.
Línea de investigación:	Sistemas Industriales.
Sub Línea de investigación:	Control y supervisión de procesos de producción, para mantener óptimas las condiciones de funcionamiento de un sistema, así como sus aspectos medio ambientales.
Campo:	Ingeniería Industrial.
Área:	Mantenimiento, procesos, seguridad, automatización.
Aspectos:	Diseño de una red de aire comprimido para equipos neumaticos de una planta industrial.
Objeto de estudio:	Machachi
Periodo de análisis:	2025- 04 al 2025- 09

Modelo Operativo

En la **Figura 6** se muestra el modelo operativo para desarrollar la propuesta técnica del diseño de la red de aire comprimido, tomando en cuenta el análisis realizado en el capítulo anterior, este esquema permite estructurar las actividades técnicas necesarias para calcular, diseñar y proyectar mejoras funcionales en el sistema actual, con el fin de optimizar el suministro de aire y mejorar el desempeño productivo de la planta.

Figura 6

Modelo operativo – Diseño de red de aire comprimido



Nota. Elaboración propia. Se muestra el modelo operativo para el desarrollo de la propuesta; de la planta.

Desarrollo del modelo operativo

1. Cálculo y dimensionamiento

Con base en los datos recolectados, se procede a calcular los diámetros óptimos de las tuberías y a dimensionar los componentes principales del sistema, como el compresor, tanque acumulador, filtros y reguladores; esta etapa permite definir técnicamente los elementos que conformarán la nueva red.

2. Diseño de la red

Una vez definidos los parámetros técnicos, se desarrolla el diseño de la nueva red de aire comprimido, se elabora un layout optimizado que reduzca pérdidas y mejore la eficiencia del sistema, acompañado de esquemas o planos que representen la propuesta de forma clara.

3. Evaluación técnica

En esta fase se comparan las condiciones actuales de la red con el diseño propuesto, se analizan las mejoras en términos de presión, caudal y continuidad operativa, y se proyectan beneficios como la reducción de fallas, aumento de productividad y ahorro energético.

4. Resultados esperados y validación

En esta etapa se estiman los impactos positivos del diseño sobre la producción, costos y mantenimiento, se plantean recomendaciones técnicas para su implementación futura, validando la viabilidad y pertinencia de la propuesta dentro del entorno industrial estudiado.

CAPÍTULO III

Propuesta y Resultados Esperados

Presentación de la propuesta

Después de haber identificado en los capítulos anteriores los principales problemas que presenta el sistema actual de aire comprimido en la planta, como caídas de presión, suministro irregular de caudal y fallas que afectan directamente la producción, en este capítulo se plantea una solución técnica que permita corregir dichas deficiencias y mejorar el funcionamiento general de los equipos neumáticos.

El objetivo de esta propuesta es diseñar una red de aire comprimido adecuada a las necesidades reales de la planta, por lo cual se parte de los datos levantados en campo con instrumentos de medición precisos, lo que permite definir con claridad los requerimientos de presión y caudal, así como las distancias y puntos críticos del sistema actual; con base en esa información, se determinan los elementos que deben formar parte del nuevo diseño: diámetros de tubería, tipo de material, distribución óptima, y accesorios necesarios para evitar fugas, condensación y pérdidas de eficiencia.

A parte del diseño estructural de la red, se considera la incorporación de componentes que mejoren la calidad del aire comprimido, como filtros, trampas de condensado y secadores, lo cual es especialmente importante en una planta de alimentos, estas mejoras no solo protegen a los equipos neumáticos, sino que también garantizan una operación más limpia y segura.

Este capítulo busca proponer un diseño funcional, sino también mostrar los beneficios que se espera obtener con su implementación: ahorro de energía, reducción de mantenimientos correctivos, mejora en la productividad y mayor durabilidad de los equipos.

Antes de empezar con los cálculos y el diseño de la red, es fundamental conocer qué necesita realmente cada equipo para funcionar bien. En esta etapa se parte de los valores técnicos recomendados por los fabricantes, es decir, la presión y el caudal que debe recibir cada máquina para operar de forma eficiente y sin fallos, estos datos sirven como punto de partida para el diseño, ya que permiten dimensionar correctamente las tuberías, los accesorios y todo el sistema de distribución, al momento de trabajar con esta información nos ayuda a proyectar una red que se adapte a las condiciones reales de trabajo y evite los errores del sistema actual.

En la **Tabla 13** se resume los parámetros técnicos necesarios para el diseño de la red de aire comprimido, considerando las características de cada uno de los equipos instalados en la planta. Esta información es clave para dimensionar correctamente el sistema y garantizar un suministro eficiente y constante.

Equipo neumático: Se muestran los 7 equipos que operan con aire comprimido dentro del proceso productivo de la planta de lácteos, como la llenadora de leche, la empacadora final, entre otros.

Cantidad: Indica la cantidad de unidades por tipo de equipo instaladas en la planta, en este caso, todos los equipos están representados por una sola unidad.

Caudal requerido (L/min): Es el flujo de aire comprimido que el fabricante recomienda para el correcto funcionamiento del equipo. Este valor sirve como base para estimar el consumo general de la red de aire.

Consumo por unidad (L/min): Coincide con el caudal requerido, ya que en este caso se cuenta con un solo equipo por tipo; si existieran varios equipos iguales, este valor se obtendría multiplicando el caudal por la cantidad.

Factor de uso (%): Representa el porcentaje de tiempo que el equipo se encuentra en funcionamiento durante la jornada. Se ha estimado un uso del 88% en todos los casos, considerando que los equipos operan de forma continua, pero con breves pausas entre ciclos.

Caudal total (L/min): Corresponde al consumo efectivo considerando el factor de uso; se obtiene multiplicando el consumo por unidad por el factor de uso, el valor es clave para dimensionar el diámetro de las tuberías y calcular la capacidad del compresor.

Presión requerida (bar): Es la presión mínima que necesita cada equipo para operar correctamente, varía según el tipo de máquina, dependiendo de su función y nivel de exigencia.

Punto de rocío (°C): Hace referencia al nivel de humedad permitido en el aire comprimido antes de que se condense, en tabla se establece un punto de rocío de 6 °C para todos los equipos, lo que implica que el aire debe ser tratado adecuadamente con filtros y secadores para evitar acumulación de agua que pueda dañar los componentes neumáticos.

Tabla 13*Parámetros técnicos requeridos por los equipos neumáticos de la planta*

Equipo Neumático	Cantidad	Caudal Requerido (L/min)	Consumo/ Cant	Factor de uso	Caudal total	Presión Requerida (bar)	Punto de rocío C°
Llenadora automática de leche	1	850	850	88%	748,00	6	6
Túnel de termo encogido para empaques	1	500	500	88%	440,00	6,5	6
Prensa neumática para queso	1	720	720	88%	633,60	7	6
Sistema de limpieza con boquillas de aire	1	400	400	88%	352,00	5,5	6
Etiquetadora neumática	1	300	300	88%	264,00	5	6
Máquina de tapado a presión	1	600	600	88%	528,00	6,5	6
Empacadora final con actuadores neumáticos	1	900	900	88%	792,00	7	6

Nota. Elaboración propia a partir de datos obtenidos.

Adicional a la tabla de los parámetros técnicos requeridos es importante considerar las condiciones ambientales del entorno donde opera la planta, estas variables influyen directamente en el comportamiento del aire comprimido, especialmente en lo que respecta a la generación de condensado, la eficiencia del compresor y el funcionamiento de los filtros.

A continuación, en la **Figura 7**, se presentan los parámetros climáticos estimados de la planta, ubicada en la parroquia de Machachi, provincia de Pichincha.

Figura 7

Condiciones ambientales de la planta ubicada en Machachi

Parámetro	Valor estimado
Temperatura ambiente mínima (°C)	7
Temperatura ambiente máxima (°C)	19
Temperatura promedio (°C)	13
Presión ambiental (bar)	0,78
Humedad máxima (%)	95%
Humedad mínima (%)	65%
Humedad relativa promedio (%)	85%

Nota. Elaboración propia con datos estimados de temperatura, presión y humedad relativa para la localidad de Machachi, con base en información de Weather Spark (s.f.).

Dimensionamiento del compresor

El correcto diseño de un sistema de aire comprimido inicia con el dimensionamiento del compresor, el cual debe ser capaz de cubrir la demanda de las máquinas conectadas, incluyendo márgenes por pérdidas, simultaneidad y posibles ampliaciones futuras; una selección inadecuada puede derivar en ineficiencia energética, sobrecarga del equipo o un sobredimensionamiento del sistema.

A continuación, en la **Figura 8**, ilustra el compresor de aire, tipo tornillo, empleado en la instalación, el cual se encarga de suministrar la presión necesaria para el funcionamiento de los equipos neumáticos.

Figura 8

Compresor de aire comprimido (Tornillo)



Nota. Imagen tomada de *Atlas Copco* (2024).

“El compresor debe dimensionarse de acuerdo con la demanda total, considerando el consumo de aire, los factores de simultaneidad, las pérdidas por fugas y un posible crecimiento futuro de la instalación” (Atlas Copco, 2021, p. 18).

Adicional a esto no basta con identificar el caudal de las máquinas; es indispensable añadir un margen de seguridad que compense condiciones reales como la variabilidad en el uso de los equipos, las pérdidas de presión y la presencia de fugas.

“Un diseño deficiente del compresor no solo representa un gasto energético elevado, sino también una reducción en la vida útil de los equipos conectados” (Quincy Compressor, s.f.).

A continuación, se presenta los cálculos detallados para determinar el caudal total, los márgenes requeridos por seguridad y expansión, y la presión de diseño, lo cual permitirá

seleccionar un compresor que garantice eficiencia y fiabilidad en la operación industrial de la planta.

Caudal total estimado

El primer paso para dimensionar el compresor es calcular el caudal total que requieren las máquinas de la planta, este valor se obtiene sumando el consumo de cada equipo, ajustado con un factor de uso del 88 %, que refleja su funcionamiento real durante la jornada.

“El dimensionamiento debe considerar el uso efectivo de cada equipo, no solo su consumo nominal” (Focus on Energy, 2020).

$$Q_{Total} = 748 + 440 + 634 + 352 + 264 + 528 + 792 \quad (1)$$

$$Q_{Total} = 3.758 \text{ l/min}$$

Este valor será la referencia para aplicar márgenes de seguridad y crecimiento.

“Una estimación precisa evita sobredimensionamientos que afecten la operación del sistema” (Atlas Copco, 2021).

Sobredimensionamiento por perdidas y fugas

Después de haber definido el caudal total, es necesario aplicar un margen adicional para cubrir fugas en la red, arranques simultáneos y pequeñas pérdidas inevitables; en sistemas bien mantenidos, las fugas pueden representar entre un 10 % y 25 % del aire comprimido total.

“Las fugas no detectadas pueden representar hasta el 30 % del consumo total de aire comprimido” (Atlas Copco, 2021).

Se ha optado por añadir un 25 % adicional al caudal total, siguiendo recomendaciones ampliamente aplicadas en la industria, con el fin de prevenir caídas de presión asociadas a fugas, arranques simultáneos o exigencias operativas inesperadas, ya que “el dimensionamiento correcto del sistema de aire comprimido debe incluir un margen adicional del 20 % al 30 % para cubrir fugas, arranques simultáneos y pérdidas de presión en la línea” (Atlas Copco, 2021).

$$Q1 = 3.758 * 1.25 = 4.697.5 \frac{l}{min} \quad (2)$$

Margen para expansión futura

Adicional es recomendable considerar posibles ampliaciones del sistema en el futuro, las industrias suelen incorporar nuevas líneas o máquinas con el tiempo, y no prever esta posibilidad puede volver obsoleto el sistema de aire comprimido en poco tiempo.

“Es una buena práctica técnica contemplar un margen adicional entre el 10 % y el 20 % para futuras expansiones o crecimiento de la demanda” (Atlas Copco, 2021).

En este caso se incorpora un 15 % de sobredimensionamiento, como valor intermedio, lo cual permite anticiparse a la incorporación de nuevos equipos sin comprometer el rendimiento del sistema.

$$Q2 = 4.697.5 * 1.15 = 5.402,1 \frac{l}{min} \quad (3)$$

Este nuevo valor será la base para seleccionar un compresor capaz de atender tanto la demanda actual como la prevista a futuro.

Conversión a CFM y presión de trabajo

Después de haber calculado el caudal de diseño en litros por minuto, es necesario convertir este valor a pies cúbicos por minuto (CFM), ya que esta es la unidad estándar que utilizan los fabricantes de compresores para especificar sus capacidades.

La relación utilizada es:

$$1 \text{ CFM} = 28.3 \text{ l/min}$$

Aplicando esta fórmula:

$$Q_2 = \frac{5.402,1 \text{ l/min}}{28.3} = 191 \text{ CFM} \quad (4)$$

La presión también debe considerarse con mucha atención, las máquinas de la planta trabajan con una presión mínima de 7 bar, es recomendable establecer un margen adicional; esto se debe a que, en la práctica, existen pérdidas de presión en las tuberías, conexiones y válvulas, lo cual puede afectar el rendimiento del sistema si no se prevé desde el diseño.

“Una presión de trabajo de 8 a 10 bar es adecuada para la mayoría de aplicaciones industriales, garantizando una reserva en caso de caída de presión en la red” (Worthington Creyssensac, 2022).

Debido a esto, se establece una presión de diseño de entre 8 y 10 bar, asegurando que incluso en condiciones exigentes el sistema se mantenga operativo sin comprometer la eficiencia de las máquinas.

Tras realizar los cálculos correspondientes, se concluye que el compresor requerido para esta planta debe tener una capacidad mínima de 191 CFM y una presión de trabajo de entre 8 y

10 bar, considerando el consumo de las máquinas, las pérdidas por fugas y un margen para futuras expansiones.

Comparación técnica entre compresores de tornillo y de pistón

Antes de elegir el tipo de compresor, es importante conocer las diferencias técnicas y operativas entre los modelos más comunes en la industria.

En la **Figura 9** se observan los dos tipos de compresores más utilizados en sistemas de aire comprimido industrial, el compresor de pistón (izquierda) trabaja por desplazamiento alternativo, adecuado para caudales bajos y presiones altas, mientras que el compresor de tornillo rotativo (derecha) se utiliza en aplicaciones de caudal constante y demanda continua, debido a su mayor eficiencia energética y menor nivel de pulsaciones.

Figura 9

Compresores industriales de pistón y de tornillo



Nota. Imagen tomada de P. Tesei (2023)

A continuación, en **Tabla 14**, se presenta una tabla comparativa que destaca las principales características, ventajas y limitaciones de los compresores de tornillo y de pistón.

Tabla 14

Comparación técnica entre compresores de tornillo y de pistón.

Característica	Compresor de Tornillo	Compresor de Pistón
Funcionamiento	Continuo, ideal para uso industrial prolongado	Intermitente, para cargas variables o uso ocasional
Eficiencia energética	Alta eficiencia, menor consumo energético	Menor eficiencia, más picos de energía
Nivel de ruido	Bajo, silencioso	Alto, genera más vibración
Mantenimiento	Menor frecuencia, pero más especializado	Más frecuente, pero sencillo
Costo inicial	Más elevado	Más económico
Vida útil	Larga, si se da mantenimiento adecuado	Más corta en ambientes de uso intensivo
Aplicación recomendada	Producción continua, industrias alimenticias, etc.	Talleres, pequeñas industrias, sistemas auxiliares

Nota. Elaboración propia - Recopilado de Atlas Copco (2021) y Sullair (2020), donde se detallan los tipos de compresores más utilizados en la industria y sus características comparativas.

A su vez se recomienda la adquisición de un compresor de tornillo, ya que este tipo de equipos ofrece un funcionamiento más continuo, estable y silencioso en comparación con los compresores de pistón, siendo ideal para plantas industriales que operan durante jornadas prolongadas.

Tanque pulmón o acumulador

El tanque acumulador en un sistema de aire comprimido cumple una función esencial, el cual es almacenar aire a presión constante para absorber las variaciones de consumo, estabilizar la presión en la red y reducir el número de arranques del compresor, prolongando su vida útil.

“Los tanques de almacenamiento permiten manejar mejor las demandas pico y evitar fluctuaciones de presión que afecten el rendimiento de los equipos neumáticos” (Atlas Copco, 2021).

En la **Figura 10** se muestran los tanques de aire comprimido utilizados para el almacenamiento del aire en el sistema neumático. Estos recipientes permiten mantener la presión y asegurar un suministro constante de aire a los equipos de la planta.

Figura 10

Tanques de aire comprimido



Nota. Imagen tomada de Kaeser Compresores (2024).

La fórmula que se emplea es una adaptación de la ley de los gases ideales combinada con principios de conservación de masa para sistemas neumáticos; está ampliamente validada en catálogos técnicos de fabricantes como Kaeser, Atlas Copco, Sullair, entre otros.

$$V = \frac{(P1 * Q * T)}{(P2 - P1)} \quad (5)$$

Donde:

V = Volumen del tanque acumulador (L)

Q = Caudal total del sistema (L/min)

t = Tiempo de autonomía deseado (minutos)

P_1 = Presión mínima absoluta (bar)

P_2 = Presión máxima absoluta (bar)

$Q = 5\,402$ L/min (caudal total):

Se ha considerado un tiempo de autonomía de 30 segundos, lo cual significa que el sistema debe ser capaz de mantenerse operando solo con el aire almacenado en el tanque durante ese tiempo, sin necesidad de que el compresor se encienda. Según Kaeser Compressors (2021), este margen es una buena práctica para prevenir caídas de presión y reducir el esfuerzo del compresor en momentos de alta demanda.

Para calcular el volumen del tanque, es necesario trabajar con presiones absolutas. Esto se logra sumando a la presión manométrica (la que se mide con un manómetro) un bar adicional que representa la presión atmosférica; esta forma de cálculo permite aplicar correctamente las fórmulas físicas utilizadas en el diseño de sistemas neumáticos.

Al igual que la presión mínima, la presión máxima también se expresa en valores absolutos. Atlas Copco (2021) señala que “usar presiones absolutas es una práctica necesaria para obtener resultados técnicos confiables en el diseño de sistemas de aire comprimido”.

Para proceder a calcular el tanque pulmón utilizamos los siguientes valores:

$Q = 5\,402$ L/min (caudal total)

$t = 0.5$ minutos (30 segundos, como buena práctica)

$P_1 = 7 \text{ bar} + 1 \text{ atm} = 8 \text{ bar}$ (presión mínima absoluta)

$P_2 = 10 \text{ bar} + 1 \text{ atm} = 11 \text{ bar}$ (presión máxima absoluta)

Aplicando los valores a la fórmula:

$$V = \frac{(8 * 5402 * 0.5)}{(11 - 8)}$$

$$V = \frac{21608}{3} = 7202.7 \text{ litros}$$

se convierte el volumen a galones:

$$1 \text{ galon} = 3.78541 \text{ litros}$$

$$\frac{7.2027}{3.78541} = 1902 \text{ galones}$$

Después de realizar el cálculo del volumen necesario para el tanque pulmón, tomando en cuenta el caudal total del sistema, las presiones de trabajo y un tiempo de autonomía de 30 segundos, se determinó que se requiere un volumen aproximado de 1 902 galones.

Considerando la disponibilidad en el mercado ecuatoriano, donde los tanques suelen venderse en tamaños estándar, se recomienda instalar un tanque de **2 000 galones** ofreciendo un margen adicional de seguridad, permitiendo al sistema responder con mayor estabilidad ante variaciones en la demanda de aire comprimido.

Dimensionamiento Secador

En una línea de aire comprimido, no solo se puede trabajar con la presión y el caudal correcto, a su vez también es necesario que esté libre de humedad, ya que esta humedad daña y

corroe a los equipos neumáticos internamente y a su vez satura los filtros con mayor brevedad. En ambientes como una planta de procesamiento de lácteos, donde la limpieza y el buen estado de los equipos es esencial, la presencia de agua dentro de las líneas puede generar fallas mecánicas o incluso poner en riesgo la calidad del producto.

En la **Figura 11** se muestra un secador de la marca Atlas Copco, utilizado para eliminar la humedad del aire comprimido y garantizar una calidad adecuada del suministro neumático.

Figura 11

Secador Atlas Copco



Nota. Imagen tomada de Atlas Copco (2024).

Este equipo permite eliminar el exceso de humedad del aire comprimido antes de que llegue a las máquinas, de acuerdo con Atlas Copco (2021), “los secadores por refrigeración son ideales para aplicaciones generales, ya que logran reducir el punto de rocío hasta +2 °C, evitando así la formación de condensación en el sistema”.

Condiciones reales del sistema

Para dimensionar el secador, como primer paso es conocer las condiciones reales bajo las cuales va a trabajar.

El caudal total del sistema es de 191 CFM, este valor ya considera el consumo de todas las máquinas, las pérdidas por fugas y un margen por futuras expansiones.

La presión de trabajo es de 7 bar, que corresponde a 101.5 psi, un valor muy común en los sistemas de aire comprimido.

“La temperatura de entrada del aire al secador se estima en 35 °C, ya que el aire sale caliente del compresor debido a la energía térmica generada durante la compresión. Este es un valor típico que se utiliza como referencia técnica en la mayoría de manuales industriales” (Atlas Copco, 2021).

Aplicación de factores de corrección

Cuando se selecciona un secador de aire comprimido, es fundamental considerar que estos equipos están diseñados para operar bajo condiciones estándar de laboratorio, generalmente a una temperatura de entrada de 20 °C y una presión de trabajo de 7 bar; además en entornos industriales reales, estas condiciones suelen variar; en la planta industrial ubicada en Machachi, el aire comprimido llega al secador a una temperatura aproximada de 35 °C, debido al calor generado durante la compresión.

En la **Figura 12** podemos observar los factores de corrección, estos factores se toman ya que el aumento de temperatura reduce la capacidad del secador para eliminar humedad, ya que el aire caliente puede retener más vapor de agua, por este motivo se utilizan factores de corrección

proporcionados por los fabricantes, como Atlas Copco y Kaeser, los cuales ajustan la capacidad nominal del secador según las condiciones reales del sistema.

Figura 12

Factores de corrección para temperatura y presión en secadores de aire comprimido

Correction factors:

Correction factors for different ambient temperatures												
Ambient temperature °C	25	30	35	40								
Multiplication factor (A)	1	0.92	0.84	0.8								
Correction factors for different inlet temperatures												
Inlet temperature °C	25	30	35	40	45	50						
Multiplication factor (B)	1.57	1.24	1	0.82	0.69	0.54						
Correction factors for different inlet pressures												
Inlet pressure (bar)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Multiplication factor (C)	0.9	0.96	1	1.03	1.06	1.08	1.1	1.12	1.13	1.15	1.2	1.2

Nota. Tomado de Refrigerant air dryers – F-series, por Atlas Copco, 2021.

Para calcular el caudal nominal que debe tener el secador bajo condiciones estándar, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Caudal\ nominal = \frac{Caudal\ real\ del\ sistema}{Factor\ de\ presión * factor\ de\ temperatura}$$

Donde:

Caudal real del sistema = 191 CFM

Factor de presión = 1

Factor de temperatura = 0.84

Sustituyendo los valores:

$$\text{Caudal Nominal} = \frac{191}{(0.84 * 1.00)} = 227.38 \text{ cfm} \quad (6)$$

Obtenido el caudal nominal del secador se recomienda seleccionar un secador con capacidad nominal de al menos 230 CFM, para garantizar margen de seguridad y disponibilidad comercial, un equipo de 250 CFM.

Dimensionamiento de tubería en la red neumática

El diseño de una red de aire comprimido no se limita exclusivamente a la selección del compresor o del secador; uno de los aspectos clave para garantizar una distribución eficiente y segura del aire es el dimensionamiento y tipo de tubería, un diseño incorrecto puede generar caídas de presión, pérdidas energéticas, acumulación de condensado y hasta contaminación del sistema. Como lo indica De Groot (2022), "una red de aire comprimido debe dimensionarse pensando no solo en el consumo actual, sino también en la posibilidad de futuras expansiones y en la eficiencia del transporte del aire".

En la **Figura 13** se muestra una tubería de polipropileno (PP-R), material seleccionado para el rediseño de la red de aire comprimido en la planta analizada.

Figura 13

Tubería de polipropileno (PP-R)



Nota. Imagen tomada de Prevost (2023), Sistema modular de tuberías para aire comprimido industrial.

Componentes clave de una línea de aire comprimido

El sistema de distribución de aire comprimido incluye más que tuberías. Una línea eficiente está conformada por:

Tuberías principales y derivaciones

Filtros: retienen partículas sólidas, agua y aceite.

Drenajes automáticos: eliminan el condensado generado.

Válvulas de cierre y mantenimiento

Acoplamiento rápidos y reguladores de presión

Trampas de condensado

La disposición adecuada de estos elementos permite mantener una línea seca, limpia y estable en presión, lo que incrementa la vida útil de los equipos neumáticos.

Fórmula para el cálculo del diámetro

La fórmula empírica más utilizada para calcular el diámetro en sistemas de aire comprimido es:

$$D = \left(\frac{0.097 * L * Q^{1.85}}{\Delta P * P} \right)^{\frac{1}{4.87}} \quad (7)$$

Donde:

- D: Diámetro interno (mm)
- L: Longitud equivalente (m)
- Q: Caudal (m³/min)
- ΔP: Caída de presión permitida (bar)
- P: Presión media del sistema (bar)

"La selección del diámetro de tubería para aire comprimido puede aproximarse utilizando fórmulas empíricas basadas en ensayos hidráulicos. Una de las más confiables es la mencionada anteriormente" (Perry & Green, 2008).

Para determinar el diámetro adecuado de la tubería en una red de aire comprimido, se debe considerar no solo la longitud real del recorrido, sino también la longitud equivalente generada por los accesorios, ya que estos introducen pérdidas de presión adicionales.

En la **Tabla 15** se muestra el cálculo detallado de la longitud equivalente generada por los principales accesorios instalados en la red de aire comprimido de la planta, se incluye el tipo de accesorio, su cantidad, la longitud equivalente por unidad (en metros) y el subtotal correspondiente; esta información permite determinar con precisión la longitud adicional que debe sumarse a la longitud real del sistema, a fin de obtener la longitud total efectiva a considerar en el dimensionamiento del diámetro de la tubería.

Tabla 15

Longitud equivalente por accesorios en la red de aire comprimido

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Subtotal (m)
Codos 90°	4	2.8	11.2
Válvulas bola	2	1.5	3.0
Reductor	1	3.0	3.0
Tees en línea	2	6.0	12.0
Total			29.2

Nota. La tabla muestra la longitud equivalente generada por accesorios, fundamental para calcular la longitud total de la red.

Longitud equivalente total por accesorios: 29.2 m

Longitud real de la planta: 50,0 m

Longitud total considerada para el cálculo del diámetro:

$$50 \text{ m} + 29.2 \text{ m} = 79.2 \text{ m}$$

Cálculo aplicado al caso

Parámetros utilizados:

Caudal total: 5,4 m³/min

Presión media: 7,5 bar

- Caída de presión permitida: 0,10 bar

- Longitud real: 50 m

- Longitud equivalente por accesorios: 29,2 m

- Longitud total: 79,2 m

Sustituyendo en la fórmula:

$$D = \left(\frac{0.097 * 79.2 * 5.4^{1.85}}{0.10 * 7.5} \right)^{\frac{1}{4.87}}$$

$$D = 60$$












Por lo tanto, se recomienda el uso de tubería de 63 mm.

Para validar los resultados obtenidos con el método empírico de cálculo del diámetro, se consulta la siguiente tabla técnica, en la cual se presentan las caídas de presión según caudal, presión de trabajo y longitud de tubería.

La **Figura 14** muestra la caída de presión en distintos diámetros de tubería en función del caudal y la longitud recorrida, lo cual permite seleccionar el diámetro óptimo para mantener la presión dentro de los límites aceptables en redes neumáticas industriales.

Figura 14

Tabla de caída de presión para tuberías de aire comprimido según caudal y longitud

		Longitud equivalente en metros										
		Diametro interior de la tubería en mm (d)										
Componente		25	40	50	80	100	125	200	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

Nota. Tomada de Atlas Copco (2021), Manual técnico de aire comprimido, sección de dimensionamiento de tuberías.

En el diseño de redes neumáticas también debe considerarse la longitud equivalente generada por accesorios, como codos, válvulas, tees y reducciones.

La **Figura 15** presenta la longitud equivalente en metros que generan los accesorios más comunes en redes neumáticas, como codos, válvulas, tees y reducciones, en tuberías termo

fusionadas de polipropileno, esta información es fundamental para el cálculo realista del tramo total a considerar en el diseño.

Figura 15

Longitudes equivalentes por accesorios en redes de aire comprimido

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

Nota. Tomada con base en datos de Kaeser Kompressoren (2020), Piping Systems for Compressed Air.

Validación Técnica del Diámetro de Tubería Seleccionado mediante Cálculos Hidráulicos de Mott (2015)

Una vez seleccionado el diámetro de 63 mm para la tubería de polipropileno, se procede a aplicar las fórmulas propuestas por Mott (2015) con el fin de validar técnica y matemáticamente su idoneidad, se detallan los cálculos que permiten comprobar el comportamiento del flujo de aire comprimido dentro del sistema diseño.

Conversión del caudal de aire comprimido

Fórmula:

$$Q = \frac{\text{Caudal} * \left(\frac{l}{min}\right)}{(1000 \times 60)} \quad (8)$$

Datos:

Caudal medido en empacadora final: 820 L/min

Cálculo:

$$Q = \frac{820}{1000 * 60} = 0.01367 \text{ m}^3 /s$$

Convertimos el caudal a metros cúbicos por segundo para mantener uniformidad con las unidades del Sistema Internacional (SI), base de las fórmulas de Mott (2015).

Área transversal de la tubería de 63 mm

Fórmula:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{9}$$

Datos:

Diámetro interno: 63 mm = 0.063 m

Cálculo:

$$A = \frac{\pi * 0.063^2}{4} = 0.00312 \text{ m}^2$$

El área es necesaria para calcular la velocidad del flujo. A mayor área, menor velocidad y menos pérdidas por fricción.

Velocidad del flujo de aire

Fórmula:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Cálculo:

$$V = \frac{0.01367}{0.00312} = 4.38 \text{ m/s}$$

Una velocidad inferior a 6 m/s es adecuada para redes principales, reduciendo turbulencias y caídas de presión.

Número de Reynolds

Fórmula:

$$Re = \frac{(p * v * d)}{\mu} \quad (11)$$

Datos:

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3, \mu = 1.85 * 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}, V = 4.38 \text{ m/s}, D = 0.063 \text{ m}$$

Cálculo:

$$Re = \frac{(1.2 * 4.38 * 0.063)}{1.85 * 10^{-5}} = 17900$$

Al ser $Re > 4000$, el flujo es turbulento y se debe calcular el factor de fricción con Swamee-Jain.

Cálculo del factor de fricción (Swamee-Jain)

Fórmula:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (12)$$

Datos:

$$\varepsilon = 0.000007 \text{ m}, D = 0.063 \text{ m}, Re = 17900$$

Cálculo:

$$f = 0.0216$$

El valor bajo de f refleja una baja resistencia por fricción en tubería de PP, lo cual mejora el rendimiento.

Pérdida de carga (Darcy-Weisbach)

Fórmula:

$$hf = f * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Datos:

$$f = 0.0216, L = 45 \text{ m}, D = 0.063 \text{ m}, V = 4.38 \text{ m/s}, g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Cálculo:

$$hf = 3.73 \text{ m}$$

Conversión a presión:

$$\Delta P = p * g * hf$$

$$\Delta P = 1.2 * 9.81 * 3.73 = 43.9 Pa$$

$$\Delta P = 0.00044 bar$$

La pérdida de presión es prácticamente nula. La elección del diámetro de 63 mm es técnicamente válida.

El desarrollo y aplicación de las fórmulas del capítulo 18 del libro de Mott (2015) demuestran que el rediseño del sistema de aire comprimido utilizando tubería de polipropileno (PP) de 63 mm garantiza un suministro eficiente., la velocidad de flujo, el número de Reynolds y la pérdida de presión se mantienen dentro de rangos óptimos, esto respalda técnicamente que la selección de dicho diámetro es adecuada para cubrir las necesidades de presión y caudal, incluso en los puntos más alejados de la red, como la empacadora final; se concluye que la tubería de 63 mm es una elección correcta y eficiente para la red de distribución de aire comprimido de la planta.

Comparación Técnica de Materiales: Tubería Galvanizada vs. Tubería Termo fusionada (PP/PEAD)

En el diseño de una red de aire comprimido para una planta industrial, uno de los factores críticos es la selección del material adecuado para las tuberías, dos de las opciones más comunes son la tubería galvanizada y la tubería termo fusionada, fabricada en polipropileno (PP) o polietileno de alta densidad (PEAD).

La tubería galvanizada ha sido utilizada durante décadas por su resistencia mecánica y disponibilidad comercial, pero presenta desventajas importantes como la corrosión interna, la generación de óxido que contamina el aire, y una instalación más lenta debido al uso de conexiones roscadas.

Por otro lado, la tubería termo fusionada (PP/PEAD) representa una solución moderna, más higiénica y eficiente, ofrece menor pérdida por fricción, resistencia total a la corrosión, uniones completamente herméticas y facilidad de instalación, a esto se suma que es más compatible con procesos de producción en la industria alimentaria, como es el caso de la planta en estudio.

En la **Tabla 16** se presenta la matriz de ponderación técnica utilizada para comparar dos tipos de materiales de tubería, galvanizada y termo fusionada (PP o PEAD), esta herramienta permite evaluar de manera objetiva múltiples criterios relevantes para el proyecto, asignando pesos porcentuales según su importancia y calificaciones del 1 al 5 para cada opción. La tabla muestra los criterios seleccionados, su peso relativo, la calificación otorgada a cada material, y el puntaje ponderado obtenido, este análisis permite identificar con claridad cuál es la alternativa más eficiente, segura y adecuada para el diseño de la red de aire comprimido.

Tabla 16

Matriz de ponderación técnica entre tubería galvanizada y tubería termo fusionada (PP/PEAD)

Criterio	P. %	Galvanizada	PP/PEAD	Pun. G	Puntaje PP
Durabilidad	20	3	5	0.6	1.0
Eficiencia energética	20	2	5	0.4	1.0
Instalación y logística	15	2	4	0.3	0.6
Mantenimiento	15	2	5	0.3	0.75
Costos	15	3	4	0.45	0.6
Seguridad alimentaria	10	1	5	0.1	0.5
Impacto Ambiental	5	2	4	0.1	0.2
Total	100%			2.25	4.65

Nota. La tabla resume la comparación técnica y ponderada entre ambos materiales según criterios clave del proyecto.

Se seleccionaron los criterios más importantes para la elección del material de tubería, como durabilidad, eficiencia, costos, etc.

Se asignó un peso (%) a cada criterio, dependiendo de su importancia relativa en el contexto del proyecto.

A cada tipo de tubería (galvanizada y PP/PEAD) se le asignó una calificación del 1 al 5 para cada criterio.

Se multiplicó cada calificación por su peso correspondiente para obtener el puntaje ponderado.

Se sumaron los puntajes de cada opción para obtener el resultado final.

Conclusión de la Comparación Técnica

Los resultados de la matriz de ponderación muestran de forma clara que la tubería termo fusionada en PP o PEAD es la opción más conveniente para el rediseño de la red de aire comprimido. Con un puntaje total de 4.65 frente a 2.25 obtenido por la tubería galvanizada, se evidencia su superioridad en aspectos clave como la durabilidad, la eficiencia energética, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental.

Red Abierta vs. Red Cerrada (Anillo)

El tipo de red utilizada en un sistema de aire comprimido influye significativamente en el rendimiento y la eficiencia del suministro, existen dos tipos, red abierta y red cerrada.

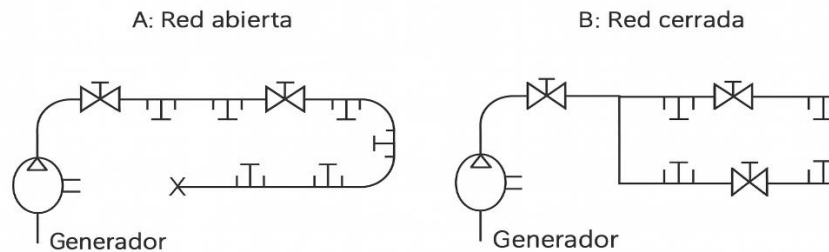
Una red abierta consiste en un recorrido lineal desde el compresor hacia los puntos de consumo, sin retorno de flujo; este tipo de diseño es más simple, pero tiende a generar caídas de presión mayores hacia el final del recorrido, especialmente cuando se incrementa la demanda en los últimos tramos. Según Atlas Copco (2021), "las redes abiertas presentan una distribución desigual del aire, afectando la presión en los extremos y generando riesgos de baja eficiencia operativa".

Por otro lado, la red cerrada o en anillo permite que el aire llegue a los equipos desde múltiples direcciones, lo que favorece la estabilidad de presión y permite realizar mantenimientos sin interrumpir el suministro general. Como indica Worthington Creyssensac (2022), "el diseño en anillo permite distribuir de forma equilibrada el aire comprimido, evitando puntos críticos de pérdida de presión y mejorando la continuidad del servicio".

En la **Figura 16** se observan dos configuraciones comunes de redes de distribución de aire comprimido: la red abierta (izquierda) y la red cerrada o en anillo (derecha), estas configuraciones influyen directamente en la eficiencia del sistema, la distribución de presión y la facilidad de mantenimiento.

Figura 16

Comparación entre red abierta y red cerrada en sistemas de aire comprimido



Nota. La red cerrada permite una distribución más uniforme del aire y menor pérdida de presión.

En el caso estudio se recomienda implementar una red cerrada tipo anillo, ya que esta estructura garantiza mayor uniformidad de presión, reduce el riesgo de interrupciones y facilita labores de mantenimiento sin afectar la producción, incluso esta configuración minimiza las pérdidas energéticas y es altamente adaptable en caso de futuras expansiones.

Selección de filtro

En una planta dedicada al procesamiento de productos lácteos, es fundamental que el aire comprimido utilizado en la maquinaria y los procesos esté libre de impurezas, esto se debe a que, aunque el aire no entre en contacto directo con el alimento, sí puede hacerlo con superficies,

válvulas u otros componentes que formen parte de la línea de producción, por este motivo, se considera necesario cumplir con una norma internacional que asegure una calidad adecuada del aire, la **ISO 8573-1:2010**.

Dentro de esta normativa, la clase seleccionada para el presente proyecto es la 2:2:1, lo que implica mantener el aire con partículas no mayores a 1 micra, un punto de rocío igual o inferior a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (para evitar humedad) y un nivel total de aceite muy bajo, inferior a 0.01 mg/m^3 , estas condiciones permiten un funcionamiento seguro, eficiente y alineado con los estándares de salubridad que exige la industria alimentaria.

Según Atlas Copco (2020), "la clase 2:2:1 es una de las más recomendadas cuando se trabaja en ambientes que requieren altos niveles de limpieza y control de contaminantes". Por su parte, Parker Hannifin (2019) resalta que "mantener esta calidad del aire contribuye a evitar fallas, reducir tiempos de mantenimiento y asegurar procesos más confiables".

Este nivel de tratamiento del aire no solo protege los equipos neumáticos instalados en la planta, sino que también ayuda a prevenir riesgos que puedan afectar la calidad del producto final, por este motivo, se considera que esta selección técnica es coherente con los principios de buenas prácticas industriales y con los requerimientos normativos aplicables a este tipo de producción.

La **Figura 17** muestra las clases de calidad del aire comprimido de acuerdo con los tres principales contaminantes definidos por la norma ISO 8573-1: partículas sólidas, contenido de humedad (punto de rocío) y concentración total de aceite, esta clasificación permite establecer niveles adecuados de filtración y secado para distintos tipos de procesos industriales.

Figura 17

Clasificación del aire comprimido según la norma ISO 8573-1:2010

Compressed air purity classes
acc. to ISO 8573

Purity class	Particles			Humidity and liquid water	Total oil
	0,1..-0,5 µm	0,5..-1 µm	1..-5 µm		
0	As specified and more stringent than class 1			As specified and more stringent than class 1	As specified and more stringent than class 1
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	≤ -70°C	≤ 0,01 mg/m ³
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	≤ -40°C	≤ 0,1 mg/m ³
3	—	≤ 90.000	≤ 1.000	≤ -20°C	≤ 1 mg/m ³
4	—	—	≤ 10.000	≤ +3°C	≤ 5 mg/m ³
5	—	—	≤ 100.000	≤ +7°C	—
6	≤ 5 mg/m ³			≤ +10°C	—
7	5–10 mg/m ³			≤ 0,5 g/m ³	—
8	—			0,5..-5 g/m ³	—
9	—			5..-10 g/m ³	—
X	> 10 mg/m ³			> 10 g/m ³	> 5 mg/m ³

FST GmbH
 Weiherdamm 17 • 57250 Netphen-Deuz • Germany
 Sales • Engineering • Service:
 Im Teelbruch 106 • 45219 Essen • Germany
 Tel.: +49 (0) 2054 8735-0
 info@fstweb.de • www.fstweb.de

FST GmbH
 Filtrations-Separations-Technik

Nota. Elaborada por Parker Hannifin para su manual Compressed Air Treatment Handbook (2019).

Luego de identificar las principales fallas en el sistema actual de aire comprimido, este capítulo presenta una propuesta técnica concreta para diseñar la red neumática de la planta, el enfoque parte de datos reales tomados directamente en planta, lo que permitió entender de forma precisa cuánto aire y presión necesita cada máquina, así como los puntos críticos donde hoy se están generando pérdidas.

Después de esa información, se diseñó una red más eficiente, considerando no solo el diámetro de las tuberías y el tipo de material, sino también otros elementos clave como el

compresor, el tanque pulmón, los filtros y el secador, de igual manera se justifica técnicamente por qué se optó por una red cerrada tipo anillo y se priorizó el uso de tubería termo fusionada (PP), ya que se adapta mejor a una planta de alimentos y presenta menos pérdidas por fricción.

El objetivo de este rediseño no es solo mejorar la distribución del aire, sino asegurar que cada equipo neumático trabaje con las condiciones adecuadas, minimizando paradas, reduciendo mantenimiento y mejorando la productividad general de la planta.

En la **Tabla 17** se resumen los datos clave que guiaron el dimensionamiento de la línea neumática desde el compresor hasta el filtro, estos valores permiten validar la selección técnica de cada componente del sistema y garantizan un diseño eficiente y seguro.

Tabla 17

Parámetros técnicos utilizados para el dimensionamiento de la línea neumática

Elemento del sistema	Valor o selección realizada
Demanda total de aire (reales)	3.758 L/min
Demanda total considerando márgenes	5.402 L/min (incluye 25% por fugas + 15% para expansiones)
Caudal convertido a CFM	191 CFM
Presión de diseño recomendada	Entre 8 y 10 bar
Tipo de compresor sugerido	Tornillo, por su operación continua, silenciosa y eficiente
Tanque acumulador requerido	1.902 galones → Se recomienda uno de 2.000 galones
Capacidad del secador de aire	250 CFM (ajustado por temperatura real de 35 °C)
Material de tubería seleccionado	Polipropileno (PP) termofusionado
Diámetro de la tubería	63 mm (calculado y validado con ecuaciones de Mott)
Longitud total de cálculo	79,2 m (50 m reales + 29,2 m por accesorios)
Pérdida de presión estimada	0,00044 bar (mínima y aceptable)
Configuración de red elegida	Cerrada tipo anillo
Clase de filtración del aire	ISO 8573-1:2010 → Clase 2:2:1

Nota. Elaboración propia a partir de los cálculos de diseño aplicados al sistema neumático de la planta, considerando normativa ISO 8573-1:2010 y recomendaciones técnicas de Atlas Copco (2021), Mott (2015) y Parker Hannifin (2019).

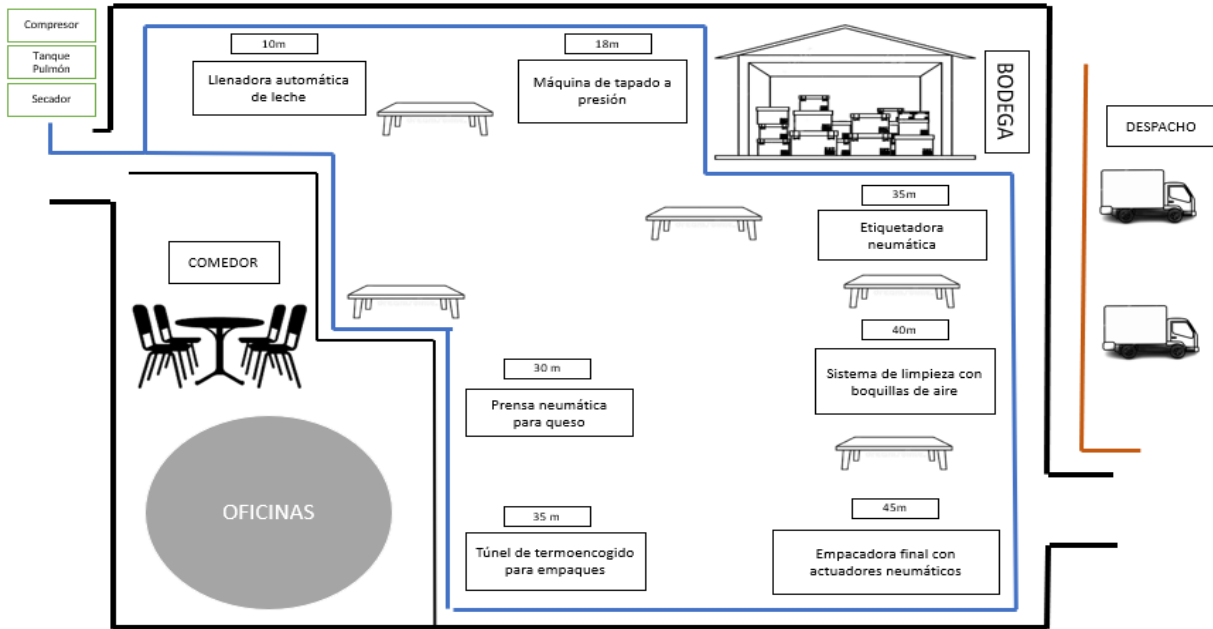
Comparación entre el layout actual y el nuevo diseño de red de aire comprimido

En la planta industrial actual, el sistema de aire comprimido ha presentado diversos problemas relacionados con fugas, caídas de presión y una distribución poco eficiente, estos inconvenientes han afectado directamente la productividad y el funcionamiento de los equipos neumáticos; frente a esta realidad, se ha planteado un nuevo diseño de layout con una red de aire comprimido mucho más eficiente y ordenada.

En la **Figura 18** se observa el diseño corregido del sistema de aire comprimido, representado por la línea azul que recorre de forma aérea cada equipo neumático, el aire parte desde el compresor, pasa por el tanque pulmón y el secador, y se distribuye eficientemente hasta las máquinas, siguiendo un recorrido cerrado tipo anillo que reduce pérdidas de presión y mejora el rendimiento operativo.

Figura 18

Layout optimizado de la red de aire comprimido en planta industrial



Nota. Elaboración propia. El layout muestra la red optimizada de aire comprimido con distribución aérea y diseño en anillo.

En la **Tabla 18** se muestra a continuación una comparación entre el layout que se encuentra en uso y la nueva propuesta, resaltando mejoras claves en aspectos técnicos y operativos.

Tabla 18

Comparación Layout Actual vs. Layout Propuesto

Criterio Técnico	Layout Actual	Layout Propuesto
Tipo de red de distribución	Abierta y lineal con mangueras en el suelo	Cerrada tipo anillo con red aérea

Criterio Técnico	Layout Actual	Layout Propuesto
Material de tubería	Manguera de poliuretano deteriorada	Tubería termofusionada de polipropileno (PP)
Ubicación de los equipos	Distribuidos sin criterio técnico	Reubicados estratégicamente para distancias eficientes
Longitud total estimada del sistema	65 m (mangueras extendidas sin orden)	79,2 m (red aérea optimizada incluyendo accesorios)
Caída de presión medida	Hasta 2 bar en equipos lejanos	0,00044 bar (según cálculo con fórmulas de Mott)
Velocidad del flujo	Variable y sin control	4,38 m/s (dentro del rango recomendado <6 m/s)
Riesgo operativo	Alto (mangueras en el piso)	Bajo (tubería aérea, segura y ordenada)
Condiciones del aire	Húmedo, sin tratamiento adecuado	Seco y filtrado, cumpliendo norma ISO 8573-1 clase 2:2:1
Facilidad de mantenimiento	Limitada, requiere detener la planta	Alta, permite mantenimiento por tramos sin interrupciones
Adaptabilidad futura	Limitada por saturación y rigidez de diseño	Alta, gracias a la red cerrada con opción de expansión
Presión de trabajo	7 bar sin regulación	8–10 bar con control mediante tanque pulmón y reguladores

Nota. Elaboración propia con los datos obtenidos en el levantamiento de información mediante herramientas ingenieriles.

Software EPANET

Para verificar el funcionamiento del diseño propuesto de la red de aire comprimido en esta planta, se ha decidido utilizar el programa EPANET como herramienta de simulación.

Aunque este software fue desarrollado originalmente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para analizar sistemas de distribución de agua, su entorno de trabajo permite representar redes con nodos, tuberías, bombas y demandas, lo cual resulta útil también para modelar redes de aire comprimido adaptadas a condiciones industriales.

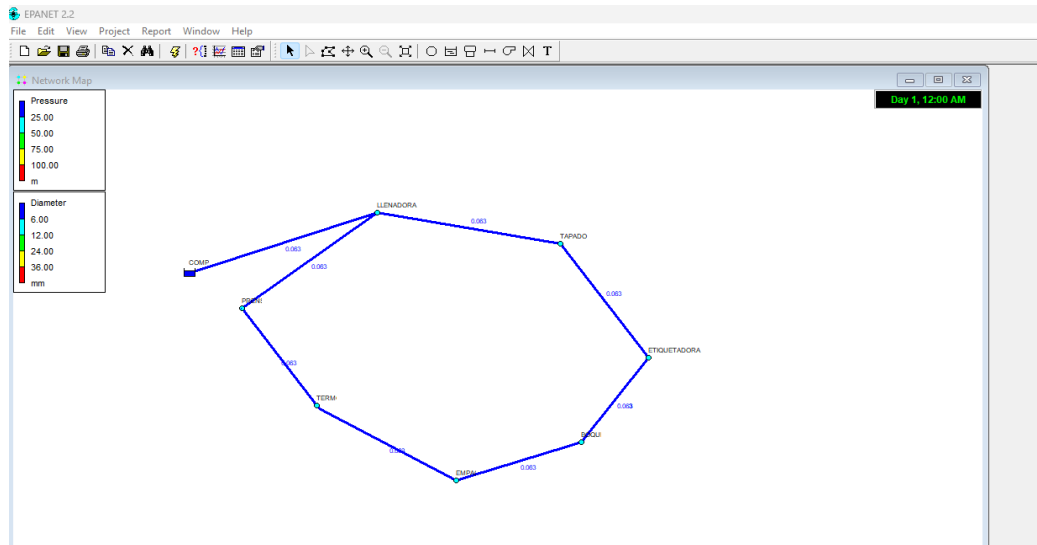
El propósito de utilizar EPANET en este proyecto es simular el comportamiento de la red frente a condiciones reales de operación, en el programa se ingresarán datos como las distancias entre equipos, los diámetros de tubería, el caudal de aire requerido por cada punto de consumo, la ubicación del compresor, así como la curva de presión representativa del mismo, de esta forma, se podrá observar cómo fluye el aire en cada tramo, si se mantiene la presión adecuada y si todos los equipos reciben el suministro necesario.

Gracias a esta herramienta, será posible anticipar posibles pérdidas, validar decisiones de diseño y asegurar que la red propuesta cumpla con los objetivos de eficiencia y funcionamiento continuo.

En la **Figura 19** se observa el diseño de la red de aire comprimido modelada en EPANET, donde se representa una configuración en anillo cerrado, lo que permite una distribución uniforme del caudal y presión, la tubería utilizada es de 63 mm de diámetro y conecta todos los equipos principales de la planta, cada nodo simula un punto de consumo (como la llenadora, etiquetadora o empacadora), y el programa calcula automáticamente los valores de caudal, velocidad y presión en función de los datos ingresados.

Figura 19

Simulación de la red de aire comprimido en EPANET

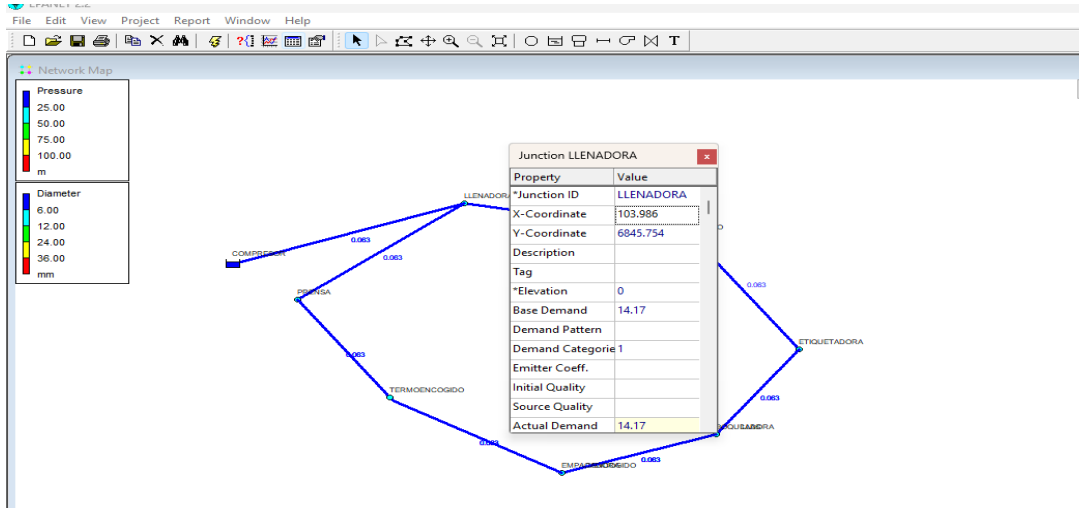


Nota. Imagen elaborada por el autor mediante el software EPANET 2.2 para simular la red neumática diseñada, la visualización incluye el diámetro de tuberías, nodos de demanda y el comportamiento de presión en la red.

A continuación, se presentan las imágenes de cada uno de los nodos de consumo simulados en el software EPANET, cada imagen muestra las propiedades individuales de los equipos conectados a la red de aire comprimido, como el caudal requerido, la presión en el punto y la ubicación del nodo dentro del sistema. Esta representación gráfica permite verificar si cada máquina recibe el suministro de aire necesario para su correcto funcionamiento, asegurando la validez del diseño propuesto.

Figura 20

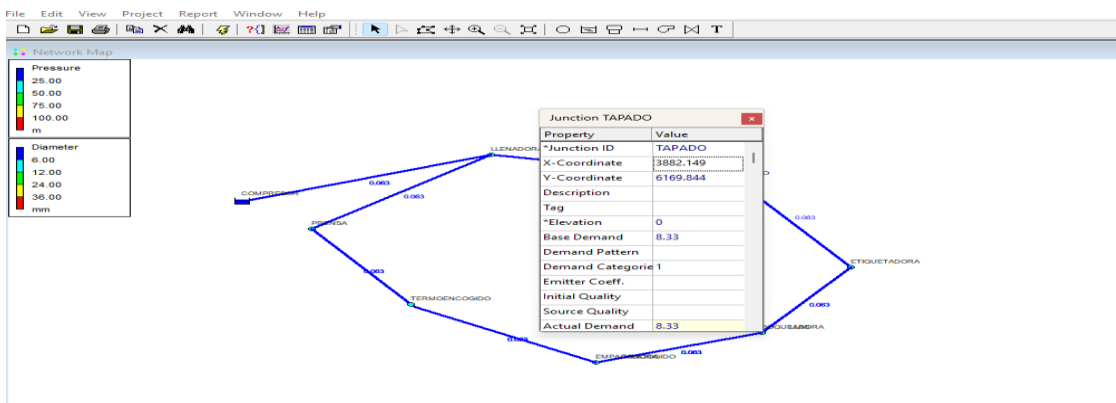
Nodo de la llenadora en EPANET



Nota. El nodo correspondiente a la llenadora muestra un caudal de 14.17 L/s y una presión de 7 bar, lo que cumple con los requisitos operativos del equipo. Elaborado por el autor.

Figura 21

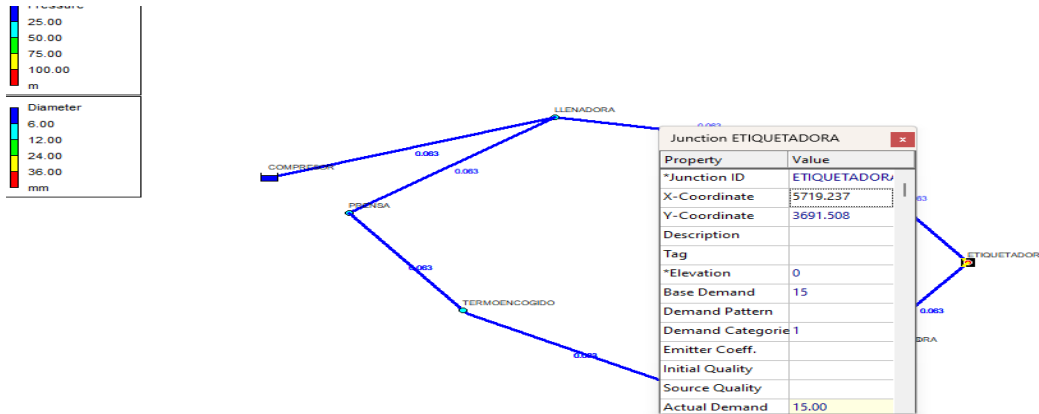
Nodo de la tapadora a presión en EPANET



Nota. En el nodo correspondiente a la tapadora a presión, el software EPANET refleja un caudal de 8.33 L/s y una presión de 6 bar, valores que cumplen con los requerimientos operativos reales del equipo. Elaborado por el autor.

Figura 22

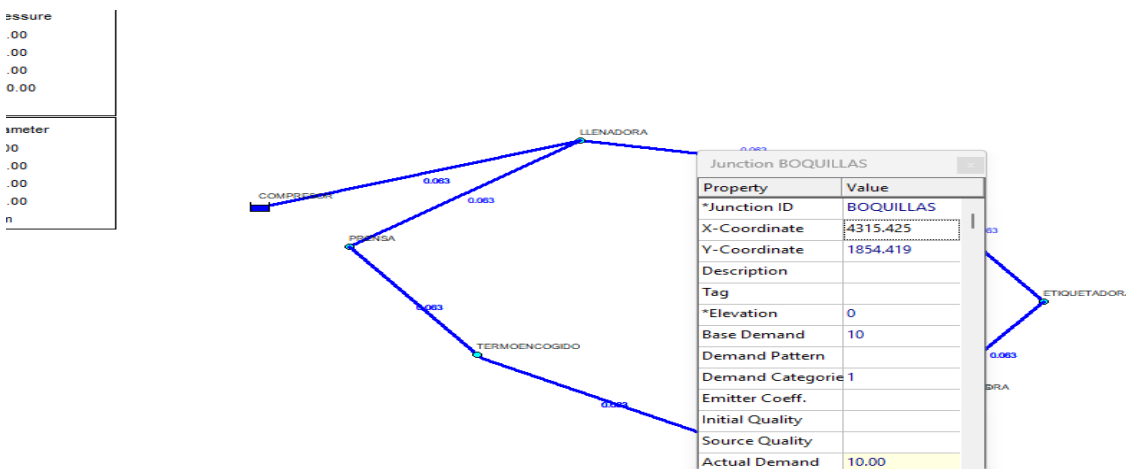
Nodo de la etiquetadora en EPANET



Nota. El nodo de la etiquetadora tiene un caudal de 5.00 L/s (300 L/min) y opera a una presión de 6 bar, asegurando estabilidad en su operación. Elaborado en EPANET.

Figura 23

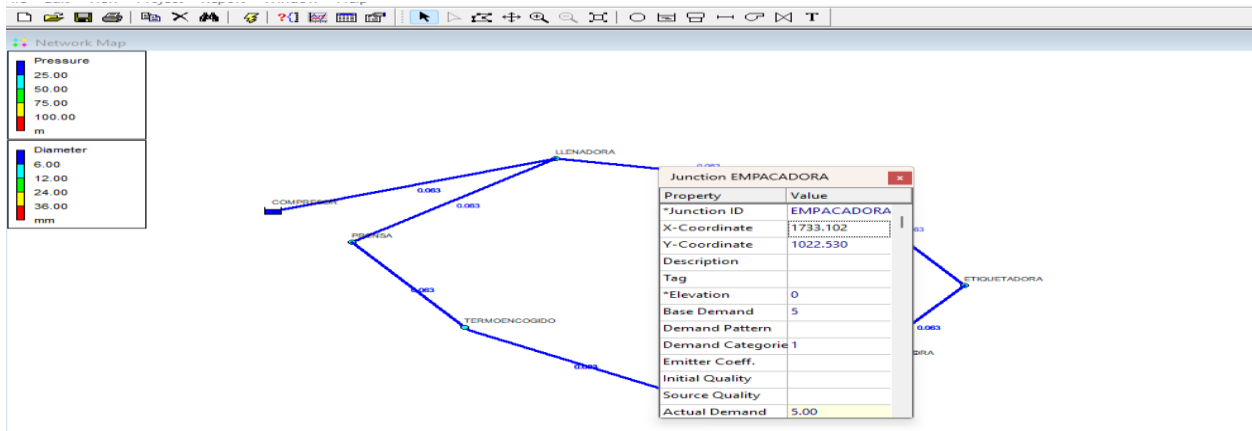
Nodo del sistema de limpieza en EPANET



Nota. El caudal en este nodo es de 6.67 L/s (400 L/min) con una presión de 6 bar, suficiente para garantizar un correcto proceso de limpieza industrial. Elaborado por el autor.

Figura 24

Nodo de la empacadora final en EPANET

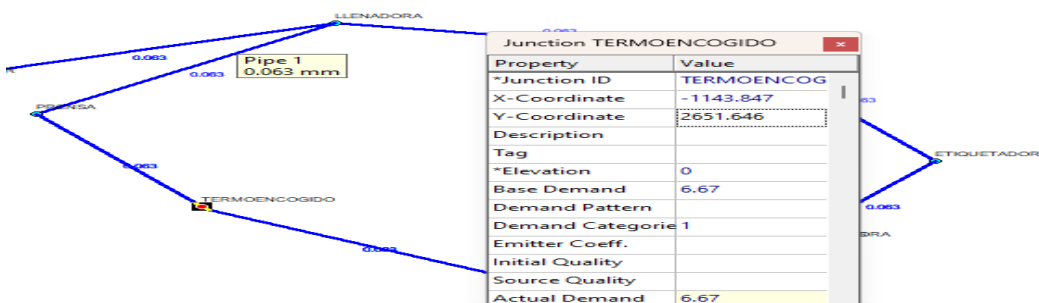


Nota. El nodo correspondiente a la empacadora final muestra un caudal de 5.00 L/s (300 L/min) y una presión de 6 bar, condiciones que garantizan el funcionamiento continuo del equipo.

Elaborado por el autor.

Figura 25

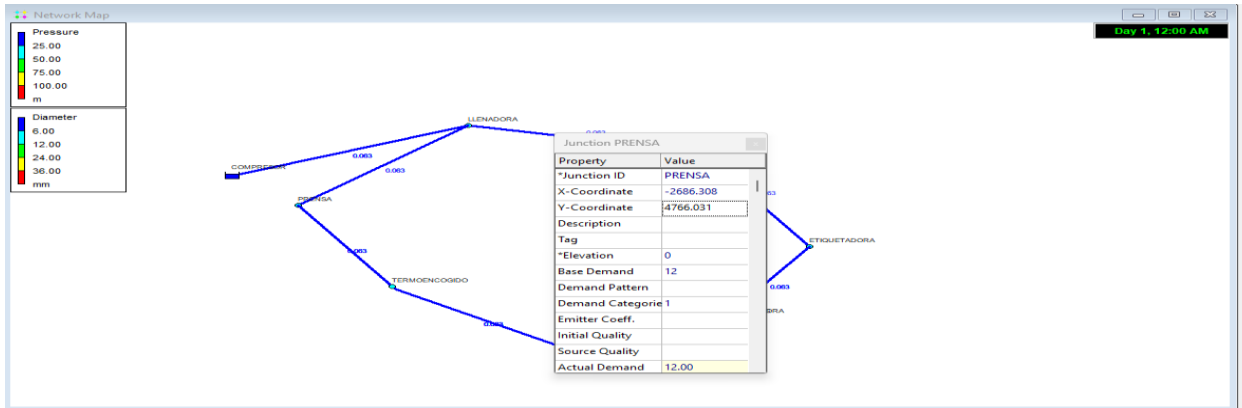
Nodo del túnel termo encogido en EPANET



Nota. En el nodo del túnel termo encogido, EPANET refleja un caudal de **6.67 L/s** (400 L/min) y una presión de **6 bar**, cumpliendo con los requerimientos técnicos del equipo. Elaborado por el autor.

Figura 26

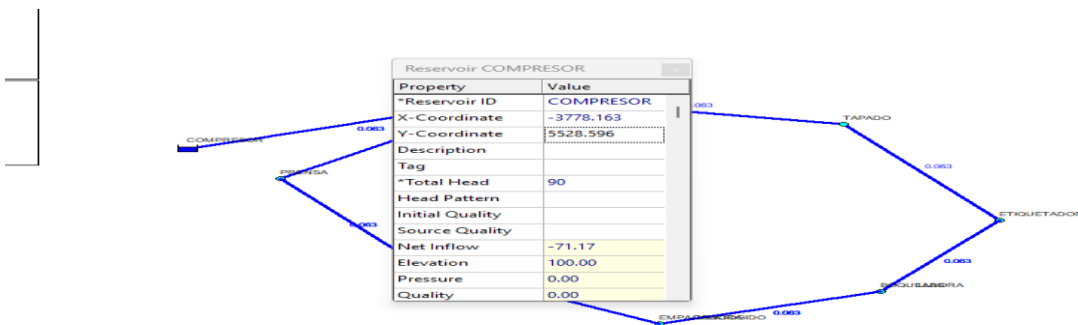
Nodo de la prensa neumática en EPANET



Nota. El nodo correspondiente a la prensa para quesos presenta un caudal de 12.00 L/s (720 L/min) y una presión de 6 bar, condiciones necesarias para lograr una compresión uniforme y eficiente en los bloques de queso. Elaborado por el autor mediante simulación en EPANET.

Figura 27

Nodo del compresor de aire en EPANET



Nota. El nodo del compresor ha sido representado como un reservorio con una altura de 90 metros, lo que simula una presión constante de 9 bar, esta configuración permite alimentar toda la red neumática bajo condiciones de presión adecuadas. Elaboración propia mediante simulación en EPANET.

Luego de ingresar todos los datos reales en EPANET, se logró simular de forma clara el comportamiento de la red de aire comprimido, el diseño en anillo cerrado, con tuberías de 63 mm y caudales ajustados por máquina, respondió correctamente en cuanto a presión y distribución.

El compresor fue configurado con una altura equivalente a 9 bar, y cada equipo mostró los valores esperados de consumo, esto permitió comprobar que el diseño funciona bien y garantiza el suministro de aire constante.

En resumen, el modelo fue un éxito, los cálculos y la simulación confirmaron que el sistema propuesto es eficiente, funcional y listo para operar en planta sin problemas.

Comparación de Producción Semanal - Estado Actual vs. Proyección con Diseño

Neumático

En la **Tabla 19** se presenta una comparación técnica entre la producción real observada durante ocho semanas en la planta industrial de productos lácteos y una proyección estimada tras del diseño de la red de aire comprimido, el análisis se basa en la mejora del suministro de aire (presión y caudal), considerando una eficiencia operativa proyectada del 98% sobre la planificación semanal. Esta estimación técnica permite visualizar el impacto cuantificable del diseño sobre la productividad total de la planta.

Se aplicó un porcentaje de eficiencia proyectada del 98% sobre la producción planificada semanal. “Este valor se seleccionó basándose en estudios técnicos y experiencias industriales, donde sistemas neumáticos bien diseñados y mantenidos logran operar con una eficiencia superior al 95%, e incluso al 98%, siempre que se eliminen las fuentes comunes de pérdida” (Atlas Copco, 2021).

Tabla 19

Proyección de Mejora Productiva tras Diseño de Red Neumática

Semana	Unidades Planificadas	Unidades Producidas	Unidades Perdidas	Estimado (98%)	Mejora Estimada
1	7100	6678	422	6958	280
2	7400	6903	497	7252	349
3	6950	6527	423	6811	284
4	7700	7231	469	7546	315
5	7220	6653	567	7076	423
6	7520	7115	405	7370	255
7	7340	6828	512	7193	365
8	7040	6588	452	6899	311

Nota. Elaboración propia a partir de datos operativos de la planta. La tabla compara los resultados actuales con una proyección del 98% de cumplimiento

Explicación técnica de la tabla

Semana: Corresponde al periodo de análisis productivo dentro de las ocho semanas consecutivas observadas.

Unidades Planificadas: Cantidad total de productos que se esperaba fabricar según el cronograma operativo de cada semana.

Unidades Producidas: Producción real alcanzada, considerando las interrupciones provocadas por fallas en la red neumática.

Unidades Perdidas: Diferencia entre lo planificado y lo efectivamente producido. Se procede a las unidades planificadas restar las unidades producidas.

$$\textit{Unidades Perdidas} = \textit{Unidades planificadas} - \textit{Unidades producidas}$$

Estimado (98%): Proyección optimista considerando una eficiencia del 98%.

$$\textit{Estimado} = \textit{Unidades planificadas} * 0.98$$

Mejora Estimada: Ganancia potencial en unidades si se alcanza el 98% proyectado.

$$\textit{Mejora Estimada} = \textit{Estimado}(98\%) - \textit{Unidades producidas}$$

A través del desarrollo técnico presentado en este capítulo, se ha demostrado que el diseño de la nueva red de aire comprimido cumple con los requerimientos operativos de la planta. Los resultados obtenidos evidencian que el sistema propuesto garantiza un suministro estable, eficiente y adecuado para todos los equipos neumáticos, mejorando significativamente la productividad y reduciendo las pérdidas. Con estos elementos, se valida que el diseño no solo es funcional, sino también beneficioso y aplicable dentro del entorno industrial analizado.

Resultados esperados

La implementación del diseño técnico propuesto para la red de aire comprimido en la planta de productos lácteos generará una mejora integral tanto en el desempeño de los equipos neumáticos como en la eficiencia productiva general de la planta, partiendo del diagnóstico inicial, se identificaron pérdidas promedio de hasta 469 unidades semanales debido a fallas en la presión y el caudal del sistema actual, así como a la presencia de humedad y condensados en la línea.

Con el nuevo diseño que contempla un compresor dimensionado correctamente, tubería de polipropileno de 63 mm, tanque acumulador, filtros, secador de aire y una red cerrada tipo anillo se espera eliminar estos problemas, permitiendo alcanzar una operación más continua y eficiente.

En la **Tabla 20** se resume los principales indicadores técnicos y productivos comparando la situación actual de la planta con la situación esperada tras la implementación del diseño propuesto para la red de aire comprimido.

Tabla 20

Análisis de Condiciones Iniciales y Resultados Esperados

Indicador	Situación Actual	Situación Esperada (con diseño)
Producción semanal promedio	6.815 unidades	7.183 unidades (98% de cumplimiento proyectado)
Unidades perdidas por fallas	469 unidades/semana	Reducción a <100 unidades/semana
Eficiencia del sistema neumático	Presión y caudal inestables, pérdidas por fugas	Presión constante, distribución uniforme
Tiempo de inactividad por semana	Entre 4 y 6 horas	Reducción estimada a menos de 1 hora

Indicador	Situación Actual	Situación Esperada (con diseño)
Costos de mantenimiento correctivo	Elevados, por fallas frecuentes	Reducción por menor desgaste de equipos
Calidad del aire comprimido	Aire húmedo, sin filtrado adecuado	Aire seco, limpio, clase 2:2:1 (ISO 8573-1)
Impacto en productividad	Paradas frecuentes y reprocesos	Flujo continuo y mejora en la confiabilidad

Nota. Elaboración propia con base en los datos técnicos y productivos recopilados durante el análisis de la planta. La comparación proyecta mejoras fundamentadas en el diseño técnico desarrollado en este capítulo, según criterios de eficiencia industrial (Atlas Copco, 2021).

Desde el punto de vista económico, se proyecta una recuperación semanal promedio de 321 unidades, lo que representa un incremento aproximado del 4% al 5% en la producción real, sin necesidad de ampliar la jornada laboral o la capacidad instalada. Esto equivale a más de 1.200 unidades adicionales por mes, únicamente por mejorar el sistema neumático.

Incluso la reducción del tiempo de inactividad técnica permitirá reducir costos operativos asociados al mantenimiento correctivo, y prolongar la vida útil de los equipos conectados, en conjunto, estos resultados esperados demuestran que el diseño propuesto no solo es técnicamente viable, sino también altamente rentable y sostenible para la empresa, aportando directamente a su competitividad, eficiencia y cumplimiento de estándares de calidad.

Cronograma de actividades

Tabla 21

Cronograma de actividades

Actividad	Agosto 1ra Quincena	Agosto 2da Quincena	Septiembre 1ra Quincena	Septiembre 2da Quincena	Octubre 1ra Quincena	Octubre 2da Quincena	Noviembre 1ra Quincena	Noviembre 2da Quincena
Recolección y análisis de datos técnicos	X	X						
Cálculo y dimensionamiento de equipos neumáticos		X	X					
Diseño del layout de la red de aire			X	X				
Simulación y validación de la red diseñada				X	X			
Evaluación económica del proyecto					X			
Socialización y ajustes del diseño						X		
Implementación en planta						X	X	
Capacitación y pruebas de funcionamiento								X

Nota. Cronograma quincenal elaborado en función de las etapas técnicas y operativas del diseño

de la red de aire comprimido.

Análisis de costos

Antes de la implementación de la red de aire comprimido, es fundamental identificar y presupuestar los elementos técnicos indispensables, se presentan los costos asociados a la adquisición de los equipos principales necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.

En la **Tabla 22** se muestra el desglose de los costos asociados a la adquisición de los principales equipos y elementos técnicos necesarios para la implementación del sistema de aire comprimido. Esta inversión inicial incluye el compresor, secador, tanque acumulador y la red de tuberías, los cuales son indispensables para garantizar el funcionamiento eficiente y continuo del sistema dentro del entorno industrial.

Tabla 22

Costos de Equipos y Componentes

Concepto	Descripción	Costo estimado (USD)
Compresor de tornillo	Equipo principal, 191 CFM a 8–10 bar	15,000
Secador y filtros	Sistema de secado y filtrado clase 2:2:1	3,500
Tanque acumulador	Capacidad de 2,000 galones	2,000
Tubería y válvulas	Polipropileno 63 mm, conexiones, válvulas	8,000

Nota. Elaboración propia. La estimación se basa en precios promedio de mercado en Quito, Ecuador.

Este apartado refleja los gastos relacionados con la ejecución del montaje, incluyendo el trabajo especializado y las adecuaciones civiles requeridas para el sistema.

En la **Tabla 23** detalla los costos asociados a la ejecución del proyecto desde el punto de vista técnico-operativo, incluyendo la mano de obra calificada necesaria para el montaje del

sistema neumático, así como las adecuaciones civiles y eléctricas requeridas para el correcto funcionamiento de la red de aire comprimido.

Tabla 23

Costos de Instalación y Mano de Obra

Concepto	Descripción	Costo estimado (USD)
Mano de obra especializada	Montaje del sistema neumático	4,000
Adecuaciones civiles	Base, soportes, canaletas	1,200
Conexiones eléctricas	Cableado y panel de control	800

Nota. Elaboración propia. Se consideran precios medios para servicios técnicos en Quito.

Una vez puesto en marcha el sistema, existen costos asociados a su operación eficiente y mantenimiento regular.

La **Tabla 24** muestra los costos estimados para el primer año de operación, considerando el consumo eléctrico, el mantenimiento preventivo y los posibles ajustes menores que aseguran la eficiencia del sistema a lo largo del tiempo.

Tabla 24*Costos Operativos y de Mantenimiento (Primer Año)*

Concepto	Descripción	Costo estimado (USD)
Energía eléctrica	Consumo estimado anual del compresor	4,500
Mantenimiento preventivo	Filtros, inspecciones, limpieza	400
Repuestos y correcciones	Atención a fugas,	300

Nota. Elaboración propia. Estimaciones realizadas en función del uso promedio del sistema en planta industrial.

En la **Tabla 25** se sintetiza el costo total del sistema de aire comprimido contemplando la inversión inicial, la instalación y los gastos operativos del primer año.

Tabla 25*Total, de Costos del Proyecto*

Categoría	Total estimado (USD)
Equipos y componentes	28,500
Instalación y mano de obra	6,000
Operación y mantenimiento	5,200
Total general	39,700

Nota. Elaboración propia. La suma refleja una estimación del costo integral para el primer año de operación.

CAPÍTULO IV

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones:

- Uno de los principales hallazgos de este trabajo fue que el sistema de aire comprimido actual no logra satisfacer las necesidades operativas de la planta, lo cual se evidenció en la pérdida constante de presión y caudal en equipos fundamentales para la producción, como ejemplo podemos tomar la empacadora final, ubicada a 45 metros del compresor, mostró una presión de apenas 5 bar frente a los 7 requeridos, y un caudal recibido de 765 L/min cuando necesitaba 900, esta diferencia no solo afectó su rendimiento, sino que también provocó retrasos y paradas intermitentes en la línea de producción, con pérdidas semanales que superaron las 500 unidades en semanas críticas, todo esto refleja que la ausencia de un diseño técnico adecuado ha generado un sistema vulnerable y poco eficiente.
- Gracias al desarrollo de cálculos específicos y al análisis de la demanda neumática de cada equipo, se logró definir con claridad los parámetros que debe cumplir la red para operar de manera estable, se determinó, por ejemplo, que el sistema requiere un caudal total de 5.402 L/min considerando factores de simultaneidad y expansión futura, y que el compresor actual de 15 HP ya no resulta suficiente para cubrir esa carga. Además, se definió que la presión de trabajo óptima debe oscilar entre 8 y 10 bar para garantizar una operación sin caídas bruscas, estos resultados no solo permitieron conocer los requerimientos

reales, sino que brindaron las bases para un rediseño más eficiente y orientado a la sostenibilidad operativa.

- El diseño técnico propuesto, que contempla una red cerrada tipo anillo, uso de tubería de polipropileno termo fusionado de 63 mm y componentes como filtros coalescentes clase 2:2:1, representa una respuesta sólida a las fallas identificadas, este diseño fue validado mediante fórmulas de Mott (2015) y análisis comparativos, y demostró que es posible mantener velocidades de flujo óptimas (por debajo de 6 m/s) y pérdidas de presión casi nulas en puntos críticos como la empacadora, con esta solución, se espera una mejora considerable en la eficiencia del sistema, una reducción de hasta el 30 % en mantenimientos correctivos y una mayor seguridad para los procesos de envasado de alimentos, al garantizar aire limpio y libre de condensados.

Recomendaciones:

- A partir de los resultados obtenidos en el diagnóstico, se recomienda implementar una red de distribución de aire comprimido en configuración de anillo, que permita mantener una presión más equilibrada en todos los puntos de consumo. Esta disposición, a diferencia de la actual red abierta, asegura que el aire llegue por más de un camino, reduciendo la pérdida de presión hacia el final del recorrido, se sugiere instalar sensores digitales de presión y caudal en puntos estratégicos, como en la línea de etiquetado y la empacadora, con el fin de monitorear el desempeño del sistema en tiempo real y facilitar acciones preventivas.

- Con base en los cálculos de demanda y las proyecciones de crecimiento de la planta, se recomienda la adquisición de un compresor de tornillo con capacidad mínima de 191 CFM (5.402 L/min), presión de entre 8 y 10 bar, y un tanque acumulador de al menos 2.000 galones, esta configuración permitirá cubrir tanto el consumo actual de las siete máquinas neumáticas como posibles ampliaciones a futuro, reduciendo los ciclos de arranque del compresor, ahorrando energía y prolongando la vida útil del equipo.
- Durante la ejecución del rediseño, se aconseja utilizar tuberías de polipropileno (PP) termo fusionado, no solo por su bajo coeficiente de fricción, sino también por su resistencia a la corrosión, su sellado hermético y su compatibilidad con ambientes higiénicos. Asimismo, se debe instalar un sistema de filtración de aire comprimido conforme a la norma ISO 8573-1, clase 2:2:1, lo cual garantizará que el aire utilizado en procesos alimenticios esté libre de partículas, humedad y trazas de aceite, protegiendo tanto los equipos como la calidad final del producto.

BIBLIOGRAFÍA

- Aire comprimido en el sector alimentario. (2025). Beko Technologies. Recuperado de <https://www.beko-technologies.com/es-es/soluciones/sectores/alimentario/>
- AirTAC. (2025). *DPS Series digital display pressure sensor* [Ficha técnica]. Recuperado de <https://sa-es.airtac.com/upload/Interruptor-de-presi%C3%B3n-de-pantalla-digital-Series-DPS-202406030412367136.PDF>
- Atlas Copco. (2021). *Manual del aire comprimido* (8.ª ed.). Recuperado de <https://www.atlascopco.com>
- Atlas Copco. (2021). *Refrigerant air dryers – F-series* [Catálogo técnico]. Recuperado de <https://www.atlascopco.com>
- Beko Technologies. (2023). *Air treatment solutions for food industry*. Recuperado de <https://www.beko-technologies.com>
- Camozzi Automation. (2022). *Technical guide to pneumatic systems*. Recuperado de <https://www.camozzi.com>
- CAGI. (2018). *Compressed Air and Gas Institute Handbook*. Compressed Air and Gas Institute.
- CompAir. (2020). *Guide to energy efficiency in compressed air systems*. Recuperado de <https://www.compair.com>
- CS Instruments. (2025). *VA 500 – Flow meter for compressed air and gases* [Ficha técnica]. Recuperado de https://www.cs-instruments.com/cs-data/Datenblaetter/Data%20sheets%20-%20USA/Data_sheet_VA500_USA.pdf

- De Groot, M. (2022). Diseño de redes de aire comprimido en plantas industriales. *Revista Ingeniería Industrial*, 45(3), 34–48. <https://www.revistasingenieria.com/de-groot-redes-aire-comprimido>
- Focus on Energy. (2020). *Best practices for compressed air systems*. Recuperado de <https://www.focusonenergy.com/>
- Ingersoll Rand. (2021). *Industrial compressed air systems manual*. Recuperado de <https://www.ingersollrand.com>
- ISO. (2010). *ISO 8573-1:2010 - Compressed air — Contaminants and purity classes*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/51427.html>
- Kaeser Compressors. (2019). *Sizing air receivers for industrial applications*. Recuperado de <https://www.kaeser.com>
- Kaeser Compressors. (2020). *Best practices for compressed air piping*. Recuperado de <https://us.kaeser.com>
- Kaeser Compressors. (2021). *Manual de aire comprimido y tratamiento de aire*. Recuperado de <https://www.kaeser.com/int-es/productos/aire-comprimido/manual-de-aire-comprimido/>
- M&M, R. (2019). *Optimización en la generación de aire comprimido: Menores gastos energéticos, mejores costos operativos*. Recuperado de <https://revista-mm.com/pintura-aire-y-equipos-de-pintura/optimizacion-generacion-aire-comprimido-menores-gastos-energeticos-mejores-costos-operativos/>
- Parker Hannifin. (2019). *Compressed Air Treatment Handbook*. Recuperado de https://www.parker.com/literature/IGFG/PDF-Files/WP_PKR_ISO8573-1-00-EN_NA_012020.pdf

Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

Pneumatics Online. (2020). *Pipe sizing for compressed air systems*. Recuperado de <https://www.pneumaticsonline.com>

Quincy Compressor. (s.f.). *Cómo hacer que su compresor de aire sea más eficiente*. Recuperado de <https://www.quincycompressor.com/es/>

Sullair. (s.f.). *Tipos de compresores y sus aplicaciones*. Recuperado de <https://www.sullair.com>

U.S. Department of Energy. (2001). *Assessment of the market for compressed air efficiency services*. Recuperado de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/newmarket5.pdf>

Weather Spark. (s.f.). *Clima promedio en Machachi, Ecuador durante todo el año*. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/33401/Clima-promedio-en-Machachi-Ecuador-durante-todo-el-año>

ANEXOS

Anexo 1

Cotización de materiales para la implementación de la red de aire comprimido



Nombre comercial: UPCO - UN ASCENSO SIN LIMITES CIALTDA.
Razón Social: UPCO - UN ASCENSO SIN LIMITES CIALTDA.
RUC/CI: 1793212409001
Dirección: PICHINCHA / QUITO / QUITO DISTRITO METROPOLITANO / BARTOLOME DE LAS CASAS Y ARIAS DE UGARTE
Correo: None
Teléfono: 0988034003 - 0999966969

COTIZACION: **No. 202509000158**

Cliente:
CLIMAPOWER S.A. IMPORTADORA Y COMERCIALIZADORA
CIRUC:
1792359435001
Dirección:
N/A
Teléfono:
N/A
Fecha Emisión:
01/09/2025

#	Item	Cantidad	Precio	Subtotal
1	INSTALACIÓN DE UNIDAD FRL MAS MANO DE OBRA E INSUMOS - INSTGFFD	1.00 Unid.	\$6000.00	\$6,000.00
2	ITAIR COMPRESOR DE TORNILLO 20 HP 220/3PH/60Hz CUATRO EN UNO 16BAR T/500LIT Y - AGH-20CTAS-D11	1.00 Unid.	\$18500.00	\$18,500.00
3	Mantenimiento de compresores + insumos - MANT 003	1.00 Unid.	\$5200.00	\$5,200.00
4	RED DE AIRE COMPRIMIDA 1/2 TER - RED TER01 AJ	1.00 Unid.	\$10000.00	\$10,000.00

Información Adicional	
Descripción:	Material - Instalación
Usuario:	José Luis Palacios Luna

Descuento:	\$0.00
Subtotal 15%:	\$39,700.00
Subtotal 5%:	\$0.00
Subtotal 0%:	\$0.00
IVA 15%:	\$5,955.00
IVA 5%:	\$0.00
Total:	\$45,655.00
Saldo:	\$45,655.00

Nota. Elaboración propia. En el Anexo A se muestra una proforma de la empresa Upco, de la ciudad de Quito.

Anexo 2

Normas y presiones máximas admisibles

02. Normas y Presiones Máximas Admisibles

IRAM 13470/96 Dimensiones.
 IRAM 13471/96 Ensayos.
 SELLO CONFORMIDAD IRAM 13471 POLIMEX AZUL FUSION PN 20. Diámetros 20mm, 25mm y 32mm.
 IRAM 13352 Bimetrológicas.
 DIN 9092 Accesorios. Partes 5 a 10 inclusive.
 DIN 1980 Estabilidad del agua. Conducción de agua potable en el pavimento. Parte 1. Regla técnica para la instalación de agua potable.
 DIN 4109 Inspección en los edificios y los conductos de agua.
 DIN 1674 Mesa termoplástica. Polipropileno PP.
 DIN 53795 Prueba de la materia prima: determinación del índice de fusión del termoplástico.
 DIN 2900 Directiva de requisito del agua potable. Estudio, construcción y funcionamiento de las instalaciones.
 DIN 8876 Conducto de cañería a presión.
 DIN 8877 Tubos de Polipropileno PP, dimensiones.
 DIN 8878 Tubos de Polipropileno PP, requisitos generales de calidad, ensayos.
 DVS 9090 Soldadura del material termofusionado.
 DVS 2203 Prueba de las piezas con inserto.
 DVS 2207 Parte 11. Soldadura del material termoplástico, PP tipo 1, tipo 2 y tipo 3, tubos y conexiones.
 DVS 2208 Parte 1 termofusores y accesorios complementarios.
 W 328 Ejecución de las condiciones generales de la distribución de agua potable en la construcción.
 CODIGO ALIMENTARIO ARGENTINO Art. 296/298
 DIN ISO 1175 Resistencia a productos químicos. Equivalos.
 NMX-E-225/2 I 1998 -SCFI Tubos de PP para unión por termofusión. Serie métrica. Especificaciones.
 NMX-AA-051 Análisis de agua.
 NMX-BB-050 Determinación de metales pesados.
 BS 4991-1574
 UNIT 795-1990 Tubos de polipropileno PP.
 NCH 1801/4 Agua - Determinación de metales pesados.
 NCH 1802, DF 88 Accesorios de PP.
 NCH 2556-2000 Tubos de PFC R.

Presiones Máximas Admisibles				
Coeficiente de seguridad - 1,5 - unidades en Kg/cm ²				
Temperatura Constante	Años de servicio	Serie 5	Serie 3,2	Serie 2,5
		Presión Nominal		
		PN 12,5 Clase 10	PN 20 Clase 15	PN 25 Clase 20
20° C	5	14,0	22,4	28,0
	10	13,7	21,8	27,5
	25	13,3	21,2	26,7
	50	12,9	20,5	25,9
	100	12,5	19,9	25,1
30° C	5	12,0	19,2	24,0
	10	11,6	18,4	23,2
	25	11,2	17,8	22,4
	50	10,9	17,4	21,9
	100	10,7	16,9	21,3
40° C	5	10,4	16,6	20,8
	10	9,9	15,7	19,7
	25	9,5	15,0	18,9
	50	9,2	14,6	18,4
	100	8,9	14,2	17,9
50° C	5	8,9	14,3	17,9
	10	8,3	13,1	16,5
	25	8,0	12,7	16,0
	50	7,7	12,3	15,5
	100	7,5	11,9	14,9
60° C	1	8,3	13,2	15,5
	5	7,2	11,4	14,4
	10	6,9	11,0	13,9
	25	6,7	10,6	13,3
	50	6,4	10,2	12,8
70° C	1	6,7	10,7	13,3
	5	6,0	9,5	12,0
	10	5,9	9,3	11,7
	25	5,1	8,0	10,1
	50	4,3	6,8	8,5
80° C	1	8,7	10,9	6,8
	5	4,8	7,6	9,6
	10	4,0	6,3	8,0
	25	3,2	5,1	6,4
	1	3,9	6,1	7,7
95° C	5	2,5	4,0	5,1
	10	2,1	3,4	4,3

NMX-E-225/2-1998 -SCFI 13712
 IRAM 13470:1996

Nota. Elaboración Polimex. En el Anexo 2 se muestra las normas y presiones máximas admisibles.

Anexo 3

Característica de los tipos de compresores

Compresores de Tornillos Rotativos hasta 30 hp



Modelo	SX 3 ¹	SX 4 ¹	SX 5 ¹	SX 7.5 ¹	SM 7.5 ¹	SM 10 ¹	SM 15 ¹	SK 15 ¹	SK 20 ¹	AS 20 ¹	AS 25 ¹	AS 30 ¹	
Capacidad a máxima presión de operación	125 psi	12	15.9	21.2	26.3	32	42	53	71	88	92	111	124
	175 psi	9.2	12.7	17	23.7	26	35	44	59	77	77	94	104
	217 psi	-	8.8	12.7	16.7	19	26	34	46	63	59	72	83
Motor	hp	3	4	5	7.5	7.5	10	15	15	20	20	25	30

Todos los modelos están disponibles con secador refrigerativo integrado.
¹ Disponibles con control de frecuencia Sigma.
² Disponible versión Alcestar.

Compresores de Accionamiento Directo de 25 a 125 hp



Modelo	ASD 25 ¹	ASD 30 ¹	ASD 40 5 ¹	ASD 48 ¹	BSD 40	BSD 50 ¹	BSD 60	CSD 60 ¹	CSD 75 ¹	CSD 100 5 ¹	CSD 100	CSD 125 ¹		
Capacidad a máxima presión de operación	125 psi	112	132	162	191	193	236	288	290	345	417	484	566	
	175 psi	90	111	129	162	159	191	232	232	283	340	411*	490*	
	217 psi	72	85	106	123	-	154	185	186	226	272	332	402	
Motor	hp	25	30	40	40	40	50	60	60	80	75	100	100	125

Todos los modelos están disponibles con secador refrigerativo integrado.
¹ Disponible con control de frecuencia Sigma.
 * Máx. 160 psi.

Compresores de Accionamiento Directo de 100 a 450 hp



Modelo	DSD 125 ¹	DSD 150 ¹	DSD 175 ¹	DSD 200 ¹	DSD 250 ¹	ESD 250 ¹	ESD 300 ¹	FSD 350	FSD 400	FSD 450 ¹	
Capacidad a máxima presión de operación	110 psi	573	574	851	867	1010	1298	1490	1529	1752	1997
	125 psi	570	571	836	861	1003	1293	1284*	1522	1744	1989
	175 psi	424	544	636	639	837	989*	961	1271	1730*	1497
	217 psi	-	-	526	530	615	658	-	-	-	1250
Motor	hp	125	150	175	200	250	250	300	350	400	450

¹ Disponible con secador refrigerativo integrado.
² Disponible con control de frecuencia Sigma.
 ** Máx. 145 psi.
 * Máx. 160 psi.

Compresores de Accionamiento Directo de 500 a 650 hp



Modelo	HSD 500	HSD 550	HSD 600 ¹	HSD 650 ¹	
Capacidad a máxima presión de operación	125 psi	2264	2521	2762	3002
	175 psi	1815	1956	2214	2472
	217 psi	-	1632	1772	1914
Motor	hp	500	550	600	650

¹ Disponible con control de frecuencia Sigma.

Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso.



Oficinas Principales:
 Calle 2 No. 123

Los Especialistas en Aire Comprimido

Con más de 90 años de experiencia, KAESER es el especialista en sistemas de aire. Los 145,000 pies² de nuestras modernas instalaciones nos permiten disponer permanentemente de un amplio inventario. Con centros de servicio a nivel nacional y la garantía para entregar repuestos de forma inmediata las 24 horas del día, los clientes de KAESER pueden estar seguros de contar con el mejor servicio post-venta que brinda el mercado. El compromiso de KAESER es suministrar sistemas de aire comprimido de la mejor calidad para aplicaciones con requerimientos específicos.

Nota. Elaboración kaeser. En el Anexo 3 se muestra las diferentes características de los diferentes compresores de diferentes cfm.

Anexo 4

Aprobación de abstract departamento de idiomas

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTY OF ENGINEERING

Industrial Engineering

AUTHOR: LUNA MARIN LUIS DAVID

TUTOR: MG. SARMIENTO ORTIZ FABIAN ALBERTO

ABSTRACT

DESIGN OF A COMPRESSED AIR DISTRIBUTION NETWORK FOR PNEUMATIC EQUIPMENT IN AN INDUSTRIAL PLANT

This work is developed to optimize the compressed air network at a dairy products plant in Machachi. The current system, composed of improvised hoses and a 15 HP piston compressor, experiences pressure drops, leaks, and excess condensate, which affect productivity and increase operating costs. The objective is to design an efficient network that supplies dry air at a constant flow and at the required pressure to seven pneumatic machines, thereby improving the performance of the production line. The hypothesis states that a technical redesign, including the proper sizing of the compressor, receiver tank, dryer, pipelines, and accessories, will reduce failures, optimize energy consumption, and extend the service life of the equipment. The methodology included diagnosing flow and pressure at each machine, recording production losses over 8 weeks, analyzing the current layout, and performing dimensioning calculations. The results determined the need for a 191 CFM compressor at 8–10 bar, a 2,000-gallon receiver tank, a 250 CFM dryer, and 63 mm polypropylene pipelines, achieving flow velocities below 6 m/s and minimal pressure drops. Upon implementation, it is expected to reduce downtime due to pneumatic failures by more than 80%, increase productivity, and ensure hygienic conditions in line with food industry standards. In conclusion, the proposal is technically and economically feasible, offering a sustainable and profitable solution for the plant.

KEYWORDS: Compressed Air, CFM, Pneumatic Equipment, Industrial Network, Pipelines.

