

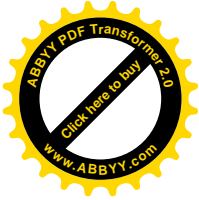
Instituto Superior Minero-Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRESIDO CON EL PROPÓSITO DE AHORRAR PORTADORES ENERGÉTICOS

**Proyecto de diploma presentado en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico**

MIGUEL ANGEL DÍAZ JIMÉNEZ

**Moa, Cuba
2011**



Instituto Superior Minero-Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

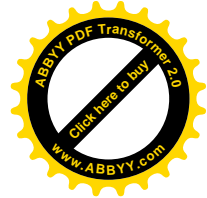
EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRESO CON EL PROPÓSITO DE AHORRAR PORTADORES ENERGÉTICOS

**Proyecto de diploma presentado en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico**

MIGUEL ANGEL DÍAZ JIMÉNEZ

Tutores: Ing. Herley M. Ricardo Sánchez
Prof. Aux., Ing. Amaury Palacio, Dr. C

**Moa, Cuba
2011**



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

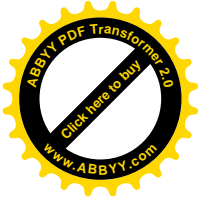
Yo, Miguel Angel Díaz Jiménez, autor de este trabajo hago constar su propiedad intelectual al Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, para su posterior utilización con fines docentes, educativos e investigativos.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

Firma del Tutor

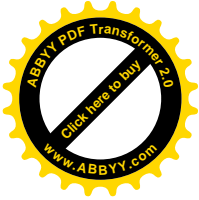
Julio de 2011



PENSAMIENTO

Siempre sentí que un científico debe al mundo sólo una cosa, que es la verdad como él la ve.

Hans Eysenck



AGRADECIMIENTOS

Desde el comienzo de mis primeros pasos, siempre he encontrado el rostro alentador de dos personas que me han enseñado el camino de la etapa que hoy termina. Agradezco eternamente a mi madre María Luisa Jiménez González y mi abuela Gladis González Cáser, por todo su amor y sacrificio para lograr mi formación y garantizar mi bienestar.

Señoras de hierro, hacia ustedes dirijo mis más sinceros sentimientos.

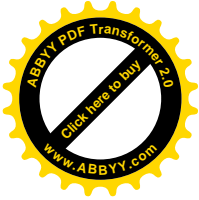
A mis tutores:

Herley Mirlén Ricardo Sánchez y Amaury Palacios Rodríguez.

A mi princesita, Yanet Lizania Ricardo Rodríguez, por haberme ayudado a encontrarme a mí mismo y por profesarme su amor.

Al grupo de tecnólogos de la planta Termoenergética de la empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”.

A todos... Muchas gracias.



DEDICATORIA

En los caminos del saber, solo la falta de imaginación determina los límites de quien busca sus verdades. En el largo camino de la vida, a veces caemos, a veces nos levantarnos, pero siempre aprendemos de las experiencias vividas.

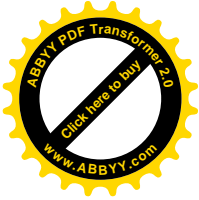
Sirva de homenaje a todas aquellas personas que incluso, sin darse cuenta, me ayudaron a levantarme.

A mi madre María Luisa por su amor incondicional.

A mis hermanos Yunion Suarez y Pablo Daniel Hill que con su llegada ha alegrado los días más tristes.

A todos los que me he encontrado en el camino y que por una razón u otra, no olvidaré jamás.

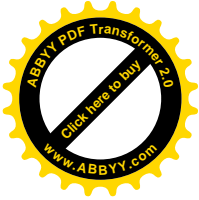
A todos, Muchas gracias.



SÍNTESIS

El propósito del siguiente Trabajo de Diploma sobre la evaluación del sistema de aire comprimido de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, fue determinar de qué forma (modificaciones al sistema) se pueden corregir las principales deficiencias que presenta la tecnología en correspondencia con el urgente ahorro de portadores energéticos. Se inspeccionó el sistema, se evaluaron las condiciones de las partes que lo forman (suministro y demanda), se recopiló la información en cuanto a fugas, estado técnico de la instalación y consumidores de aire comprimido. Con estos elementos se obtuvo una base de datos y se procesó la información obtenida mediante herramientas modernas en evaluación y análisis de sistemas de aire comprimido. Se detectaron deficiencias como fugas, conexiones innecesarias y excesiva presencia de condensado en las redes de distribución de aire. Las propuestas planteadas reportan el ahorro de 1902,56 toneladas de combustible convencional, necesario para la generación del aire que se pierde a través de las fugas detectadas en el sistema.

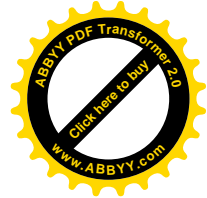
Palabras claves: tecnología, portadores energéticos y petróleo equivalente



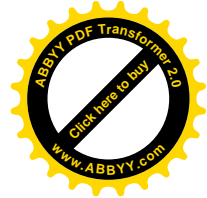
SYNTHESIS

The purpose of the following undergraduate work on the evaluation of compressed air system of the company "Commandant Ernesto Che Guevara", was to determine how (changes to the system) can correct the main shortcomings of the technology in correspondence with the urgent saving energy carriers. The system was inspected, evaluated the conditions of the parties that form it (supply and demand), the information was collected for leaks, the technical condition of the facility and consumers of compressed air. With these elements we obtained a database and processed the information obtained through modern tools in evaluating and analyzing compressed air systems. Deficiencies were detected as leakage, unnecessary connections and excessive presence of condensate in air distribution networks. The proposals made 1902, 56 reported saving tons of fuel oil for the generation of air is lost through leaks in the system detected.

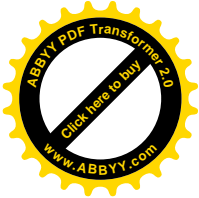
Key words: technology, energy carriers, and oil equivalent



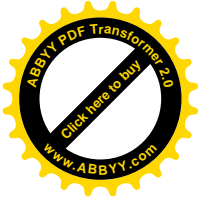
ÍNDICE	PÁG
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 Referencias históricas y análisis bibliográfico.....	20
1.1.1. Antecedentes	21
1.2. Fundamentos teóricos.....	23
1.2.1. Aire.	23
1.2.2. ¿Qué es el aire comprimido?.....	23
1.2.2.1. Generalidades del aire comprimido.	24
1.3. Sistema industrial de aire comprimido.....	25
1.3.1. Compresores.....	25
1.3.2. Clasificación general de los Compresores..	26
1.4. Accesorios de un sistema de aire comprimido.....	27
1.4.1. Filtros de succión.....	27
1.4.2. Sistema de enfriamiento.....	28
1.4.3. Recuperadores de calor.....	28
1.4.4. Filtros.....	29
1.4.5. Lubricadores.....	29
1.4.6. Controladores de flujo.	29
1.4.7. Recibidores de aire (Tanques de almacenamiento).....	29
1.4.8. Trampas y drenajes.....	29
1.5. Sistema de distribución	30
1.6. Requerimientos de una red de aire comprimido	30
1.7. Preparación del aire comprimido	31
1.8. Principales variables que caracterizan el transporte del aire comprimido por tuberías.....	31
1.9. Análisis teórico de la revisión bibliográfica	33



1.10. Justificación del proyecto	33
1.11. Conclusiones del capítulo	35
CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES	37
2.1. Metodología empleada	37
2.2. Características de la materia prima (aire atmosférico).....	38
2.3. Descripción de la situación actual del sistema.....	38
2.4. Distribución de aire comprimido por tuberías	39
2.4.1. La red actual.....	39
2.5. Diagnóstico del sistema.....	42
2.6. Diseño de propuestas para mejorar la tecnología	44
2.6.1. Plan de implementación (metodología de análisis de sistemas).....	45
2.7. Herramientas y equipos empleadas.....	45
2.8. Valoración económica de las propuestas.....	45
2.9. Conclusiones parciales.....	45
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	47
3.1 Descripción del sistema actual.....	47
3.1.1. Análisis del sistema de aire comprimido (Suministro y Demanda).....	48
3.1.1.1. Casa de compresores	48
3.1.1.2. Edificio viejo de la planta de gas.....	51
3.1.1.3. Caracterización del aire suministrado a los consumidores	53
3.2 Distribución de aire comprimido (consumidores).....	54
3.3. La red actual.....	57
3.3.1. Ampliaciones en los últimos tiempos.....	58
3.4. Diagnóstico de la instalación.....	58
3.4.1. Situación que presenta el sistema de aire comprimido.....	58
3.4.1.1. Área de compresores (producción)	59
3.4.1.2. Diagnóstico de accesorios	60
3.4.1.3. Diagnóstico de las redes de distribución	61
3.4.1.3.1. Caídas de presión en el sistema.....	62
3.4.1.3.2. Fugas de aire comprimido.....	63



3.4.2. Diagnóstico general	63
3.5. Propuestas de mejoras para el sistema.	64
3.5.1. Propuestas para mejorar el funcionamiento de la tecnología....	65
3.5.1.1. Propuestas para reducción de costos	65
3.5.2. Justificación de las propuestas	65
3.5.3. Estudio económico de las propuestas	66
3.5.3.1. Costo de energía.....	66
3.6. Plan de implementación (metodología de análisis).....	69
3.7. Conclusiones parciales.	72
CONCLUSIONES.....	73
ANEXOS	



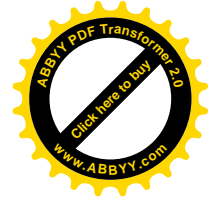
INTRODUCCIÓN

El hombre en los últimos años de la historia ha desarrollado métodos industriales que han hecho su vida más fácil y agradable en muchos aspectos. El aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que se conoce y se aprovecha para reforzar los recursos físicos. El descubrimiento consciente del aire, como medio que nos rodea, se remonta a muchos siglos, lo mismo que un trabajo más o menos consciente con dicho medio.

El aire comprimido tiene un amplio desarrollo en la industria moderna y esto se debe a que actualmente constituye la fuente de energía, después de la electricidad y el gas natural, que más se utiliza en el mundo industrializado. De ahí que pueda emplearse en un sin número de aplicaciones.

La primera transmisión neumática data del año 1700, cuando el físico francés Denis Papin empleó la fuerza de un molino de agua para comprimir aire que después se transportaba por tubos. Aproximadamente un siglo después, el inventor británico George Medhurst obtuvo una patente para impulsar un motor mediante aire comprimido, aunque la primera aplicación práctica del método suele atribuirse al inventor británico George Law, quien en 1865 diseñó un taladro de roca en el que un pistón movido por aire hacía funcionar un martillo. El uso de este taladro se generalizó y fue empleado en la perforación para el túnel ferroviario de Mont Cenis, en los Alpes, que se inauguró en 1871, y en el túnel de Hossac, en Massachusetts (Estados Unidos), inaugurado en 1875. Otro avance significativo fue el freno de aire comprimido para trenes, diseñado hacia 1868 - 1869 por el inventor, ingeniero e industrial estadounidense George Westinghouse (CONAE, s.a).

Sólo a partir del año 1950, aproximadamente, se puede hablar de una verdadera aplicación de la neumática en los procesos industriales. A pesar de que esta técnica fue rechazada en un inicio, debido en la mayoría de los casos a la falta de conocimiento e información, fueron ampliándose poco a poco los diversos sectores de aplicación. En la



actualidad, ya no se encuentra una moderna explotación industrial sin el uso del aire comprimido. Este es el motivo de que en las ramas industriales más variadas, se utilicen aparatos neumáticos cuya alimentación continua y adecuada de aire, garantizará el exitoso y eficiente desempeño de los procesos productivos.

La primera vez que se usó el aire comprimido a gran escala fue en el soplado de metales para su enfriamiento. El invento del fuelle favoreció la obtención de nuevos metales al alcanzarse temperaturas más elevadas en los hornos y a partir de entonces se unió el aire comprimido a los procesos metalúrgicos.

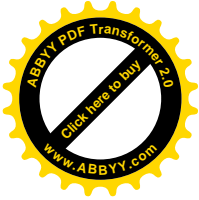
Durante el siglo XIX comenzó a estudiarse el aire como sistema de transporte en energía. Hoy en día, el aire comprimido es uno de los servicios que con mayor frecuencia se utiliza en la industria. Versátil y seguro, es empleado como un fluido de limpieza, refrigerante, elemento transportador, activador de herramientas neumáticas y de diversos sistemas de control e incluso en los mismos procesos productivos y tecnológicos. Muchos procesos robotizados no se conciben sin este importante recurso.

Se usa de forma intensiva en la pequeña y mediana empresa, principalmente en los sectores industriales de alimentos, textil, del vestido, maderera, mueblería, papelería, química y la industria del plástico entre otros.

Su costo generalmente no se asocia a los costos de producción a pesar de que utiliza, sin lugar a dudas, una cantidad sumamente significativa de energía, por lo que llega a ser mucho más caro que la electricidad, el gas y, en algunos casos, que el agua.

Típicamente, un sistema de aire comprimido, con una vida promedio de 10 a 15 años divide sus gastos en aproximadamente de un 70 a 83 % de electricidad, 13 % en inversiones de capital y 4 % en mantenimiento. No obstante, la ventaja de que a diferencia de otros servicios, el aire comprimido se genera directamente en las instalaciones del usuario, esto permite incorporar elementos de control para la correcta y eficiente explotación de la tecnología.

Por lo que el entender y poner especial atención a la forma en que operan estos sistemas, puede conducir a identificar y aprovechar una serie de “áreas de oportunidad”, que permitirán incrementar el desarrollo de la tecnología, evitar el uso inadecuado de la energía (despilfarro), aumentar la calidad y productividad de los procesos, y por tanto, la competitividad de las empresas.



En la práctica, la calidad del aire comprimido desempeña un papel primordial, tanto en aplicaciones de producción, como por ejemplo, la parte del mantenimiento en el sector de alimentos y conservación de los equipos y accesorios de las redes de distribución de aire.

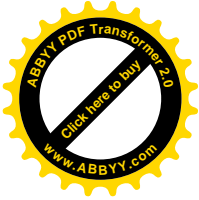
El aire es una mezcla gaseosa sin olor ni sabor que llena todos los espacios considerados ordinariamente como vacíos, por lo que su existencia es ilimitada y de fácil acceso. Se considera la utilidad fantasma de la industria, debido a que no se puede comprar por lo que se hace necesario producirlo.

Es utilizado en la mayoría de las industrias debido a que es un fluido de trabajo, abundante, de fácil obtención y no contaminante. Sin embargo, cuando se requiere diseñar un sistema de aire comprimido, se necesita un estudio detallado de la instalación y de cada uno de sus elementos, cuyos requerimientos de calidad varían de una aplicación a otra. Por ejemplo, los sistemas de instrumentación y control, necesitan aire relativamente a baja presión, bajo contenido de agua, aceite y partículas extrañas. Por otra parte los elementos de trabajo, requieren aire a más alta presión, limpio y con escasa humedad no siendo tan exigentes los parámetros de calidad en estos casos.

El objetivo de un sistema de aire comprimido es lograr distribuir el aire en toda la planta (empresa, taller, laboratorio o área donde se requiera el servicio), a una presión y caudal determinado para llevar a cabo los procesos que lo demandan y evitar paros no programados por desperfecto en el equipamiento que lo utiliza.

La tecnología se refiere a una técnica o aplicación tecnológica que hace uso del aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor. En la mayoría de las aplicaciones no sólo se comprime sino que también se deshumifica y se filtra. Su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes.

El compresor es la máquina que impulsa aire, gases o vapor, ejerciendo influencia sobre las condiciones de presión. La compresión puede producirse mediante dos procesos, compresión dinámica (conversión de la velocidad del aire en presión) a través de compresores radiales y axiales y la compresión por desplazamiento (reducción del volumen de aire) a través de compresores alternativos (de tipo pistón) y rotativos (helicoidales, de paletas, Roots o de anillo líquido).



Para garantizar la confiabilidad de la aplicación del aire en un mando neumático, es necesario que además de experimentar un aumento de presión a través de la disminución de su volumen, presente una serie de condiciones determinadas como presión correcta, cantidad necesaria, aire seco y aire limpio.

El aire al salir del compresor es prácticamente inutilizable, ya que lleva en suspensión impurezas atmosféricas, agua y restos de aceite además de obtenerse a altas temperaturas, debido al proceso de compresión. Ello significa que en el grupo de producción deben estar presentes otros componentes auxiliares que hagan, con su presencia, que el aire pueda ser utilizado sin problemas por el equipamiento neumático.

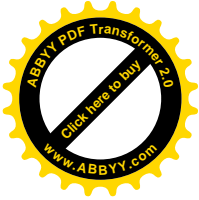
Si no se cumplen estas condiciones, es posible que en la aplicación del aire comprimido que nos genera esta máquina (compresor) se originen inconvenientes productivos por tiempo de inactividad de las máquinas a las cuales se suministra el servicio y un aumento de los costos productivos, así como de posibles reparaciones.

La generación comienza por la compresión del aire. Este circula a través de una serie de elementos antes de alcanzar su punto de consumo.

El tipo de compresor y su ubicación en el sistema inciden en mayor o menor medida en la cantidad de partículas, aceite y agua que se van incorporando al proceso. A fin de conseguir una línea de aire comprimido que reúna las mejores condiciones de garantías para realizar el trabajo, es recomendable utilizar una serie de accesorios para una correcta instalación de aire comprimido como son: filtro de aspiración, compresor, acumulador de aire a presión, secador, filtro de aire a presión con separador de agua, regulador de presión, sistemas de lubricación y puntos de evacuación del condensado que se genera.

En las industrias cubanas del níquel, es muy amplia su utilización, donde se manejan grandes flujos de aire a consecuencia de las complejas tecnologías que así lo exigen para lograr elevados índices de calidad en los procesos productivos. En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ubicada en Moa, existen redes de distribución de aire, producido en la planta termoenergética.

En el área de compresores se producen cuatro tipos fundamentales de aire, estos se diferencian de acuerdo a los parámetros de calidad, los que están determinados por su



empleo en las tecnologías productivas de la empresa. En la práctica cotidiana de la industria niquelífera, se nombran de la siguiente manera:

1. Aire de transporte neumático.
2. Aire tecnológico.
3. Aire de instrumentación.
4. Aire de servicio.

El aire se emplea en etapas vitales del proceso tecnológico de la fábrica, como por ejemplo, el transporte neumático del mineral a las tolvas mezcladora, del mineral hasta los silos, del mineral a las tolvas de los hornos de reducción, aereación de tolvas y silos, transporte neumático del polvo de los electrofiltros, además del aire tecnológico para las necesidades de la planta de lixiviación y lavado que requiere un elevado flujo para el funcionamiento de los turboaeradores, por lo que su producción es a gran escala y el control de sus parámetros debe justificar económicamente los costos.

Por otra parte, la producción de aire de instrumentación y servicio, igualmente alcanzan valores de gran consideración en consecuencia con los costos productivos de la empresa, sobre los que influyen negativamente.

Por lo expuesto anteriormente, resulta importante el estudio de la instalación con el fin de obtener mejores índices de eficiencia durante el desarrollo de los procesos metalúrgicos de la empresa.

Por lo que se identifica como **Problema de la investigación:** Insuficiente control de los parámetros de consumo y pérdidas de energía en el sistema de aire comprimido de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

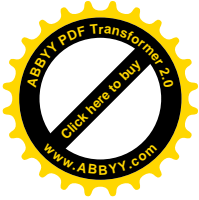
Objeto de estudio: Redes del sistema de producción y distribución de aire de la empresa niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Objetivo general

Localizar y disminuir las principales deficiencias existentes en el sistema de distribución de aire de la empresa metalúrgica “Comandante Ernesto Che Guevara”, con la finalidad de ahorrar portadores energéticos.

Hipótesis

Si se controlan los parámetros del proceso de producción y distribución de aire, se podrá racionalizar eficientemente su consumo y disminuir pérdidas energéticas.



Objetivos específicos

- Caracterizar la distribución y consumo de aire comprimido según los planes de producción, atendiendo a cada tipo de aire que se produce.
- Evaluar el sistema y proponer mejoras al mismo que garanticen el aumento de la eficiencia.
- Proponer una metodología de análisis, que permita identificar los problemas más frecuentes que causan la ineficiencia de los sistemas y tomar decisiones precisas que aseguren el ahorro de los recursos energéticos.

Tareas planteadas

1. Estudio de la teoría de aire comprimido y la relación con los procesos metalúrgicos y las nuevas tecnologías.
2. Revisión bibliográfica de trabajos investigativos relacionados con la tecnología de producción y distribución de aire comprimido y en especial los relacionados con evaluación y diagnósticos de sistemas.
3. Reconocimiento del sistema, análisis de las condiciones de trabajo y evaluación del consumo energético de los compresores.
4. Desarrollo del balance de aire.
5. Determinación de la posición más ventajosa para la ubicación de los instrumentos de medidas en las líneas de distribución y localización de áreas de oportunidades.
6. Trabajo de campo, evaluación y delimitación de propuestas.
7. Procesamiento de la información y evaluación de los resultados.

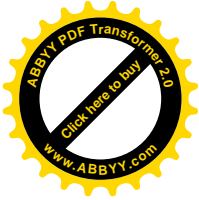
Campo de acción: Tecnología de aire comprimido, suministro y demanda.

Alcance del trabajo

La fábrica, para el desarrollo de sus procesos productivos, cuenta con diferentes áreas de servicio que se encargan de suministrar la energía necesaria para que cada línea de producción cumpla con su tarea.

Dentro de los de servicios se encuentran, la energía eléctrica, el aire comprimido, el vapor y el agua.

El presente trabajo se desarrolló en el área de servicios de aire comprimido y específicamente se evaluaron las condiciones de operación del sistemas de generación



de aire, el cual interrelaciona los equipos compresores, accesorios y las redes de distribución.

Se empleó la técnica de recopilación de datos para determinar la cantidad de equipos que generan aire comprimido y las condiciones de trabajo de cada uno. Se realizó un diagnóstico que ilustra las condiciones actuales de operación en las partes de suministro y demanda, además del comportamiento del sistema en el período de estudio (dos meses). Los parámetros de análisis fueron:

- Presión de operación.
- Entrega de aire por los compresores.
- Demanda.
- Distribución.
- Energía eléctrica utilizada.

Aportes

Los trabajos investigativos fundamentan el desarrollo técnico, educativo y social de los procesos y tecnologías aplicadas en las industrias modernas. El apoyo sistemático generado por las consecutivas innovaciones científicas y técnicas desarrolladas por los técnicos industriales y científicos en los diversos sectores, aseguran el crecimiento y perfeccionamiento constante de las tecnologías aplicables a los procesos productivos.

Con este trabajo se pretende apoyar el desarrollo económico y social de la empresa en los siguientes aspectos.

Económico:

- Disminución de costos en correspondencia con el ahorro de portadores energéticos empleados en los procesos metalúrgicos.

Tecnológico:

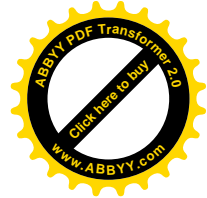
- Aumento de la eficiencia del sistema y de la empresa.
- Actualización de planos y diseño de planos de las propuestas planteadas.

Científico:

Análisis causa y/o efectos de deficiencias en sistemas de aire comprimido.

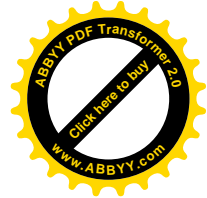
Metodológico:

- Metodología de análisis de sistemas de aire comprimido.

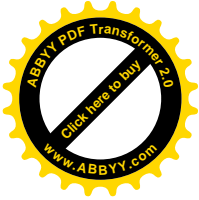


Resultados esperados

- Posibilidad de ahorro de portadores energéticos.
- Planos con diseño de las propuestas planteadas.
- Plan de implementación.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

La realización de cualquier investigación científica debe estar sustentada por una investigación teórica de los antecedentes de la temática que se desee investigar. Todo esto posibilita una adecuada comprensión teórica y facilita un acercamiento real a la situación en que se encuentra la línea de investigación.

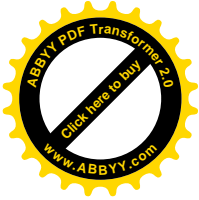
La metodología de esta investigación teórica pretende poder solucionar el problema planteado sobre el sistema de aire comprimido de la industria “Comandante Ernesto Che Guevara”, el cual está relacionado principalmente, con una red de aire comprimido que ha ido creciendo en correspondencia con las necesidades productivas de la empresa.

1.1. Referencias históricas y análisis bibliográfico

En la antigüedad los griegos fueron cautivados, en su búsqueda de la verdad, por cuatro “elementos” que se presentaban con relativa continuidad y abundancia. Éstos eran: el agua, el aire, el fuego y la tierra.

El aire, en particular, parecía por su naturaleza volátil y presencia transparente, la más fina expresión de la materia, que en otras “densidades” o “estados” constituía, además, los otros “elementos”. En griego, la palabra pneúma significa “corriente de aire, soplo” y en consecuencia la técnica que utiliza el aire como vehículo para transmitir energía se llamó NEUMÁTICA (COLCIENCIA, s.a).

A partir de entonces el aire comprimido se usó de muy variadas maneras, en algunos casos, tal como se presenta en la naturaleza, o sea, en movimiento. La navegación a vela fue quizás la más antigua forma de aprovechamiento de la energía eólica. Más tarde los molinos de viento la transformaron en energía mecánica, permitiendo en algunos casos, mover máquinas en moliendas además de bombeadores capaces de desplazar agua unos cuantos metros por encima del nivel en el que estaban operando. El aire presenta en general connotaciones muy importantes desde el punto de vista de su uso, desde su



necesidad para la vida, hasta contener olas en el mar, o impedir el congelamiento de agua por burbujeo.

El aire ha sido empleado en importantes funciones cuya evolución se resume de la manera siguiente según NORGREN (NORGREN, s.a).

1500 aC Fuelle de mano y de pie.

1762 dC Cilindro soplante.

1776 dC Prototipo compresor neumático.

1861 dC Perforadoras neumáticas.

1865 dC Correo neumático de París (Francia).

1869 dC Freno de aire para ferrocarriles.

1874 dC Correo neumático de Viena (Austria).

1875 dC Correo neumático de Berlín (Alemania).

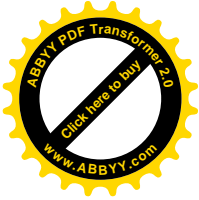
1888 dC Reloj neumático.

1891 dC Compresores de dos etapas.

A partir de allí continuó una franca expansión de la aplicación de la técnica neumática, acto que se produce en forma simultánea con la utilización del vapor, y que coincide con el conocido hecho de la Segunda Revolución Industrial. En nuestros días la neumática ha tomado fundamental importancia, sobre todo, en aplicaciones donde la velocidad de actuación debe ser elevada y particularmente en instalaciones donde la seguridad es el factor más importante.

La idea de distribuir el aire comprimido es algo que surgió hace bastante tiempo. Una de las distribuciones más espectaculares que se hizo fue la que se llevó a cabo en París, allá por el año 1865. Ya en ese entonces hubo que enfrentar el problema que significa hacer llegar el aire comprimido a cada área de trabajo.

El asunto reviste bastante importancia pues con él están relacionados los siguientes temas: tipo de red, material de la tubería, tipos de unión, dimensiones, pérdidas de presión, accesorios, forma de montaje y otros.



1.1.1. Antecedentes

Durante el desarrollo del proyecto se consultaron diferentes trabajos y estudios realizados en el campo de la producción de aire comprimido, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, los trabajos que sobre el tema, desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Numerosos estudios se han realizado desde el punto de vista tecnológico para lograr mayor eficiencia en la generación, tratamiento, transporte y uso del aire comprimido. Así en cuanto a la termodinámica del proceso de compresión de aire.

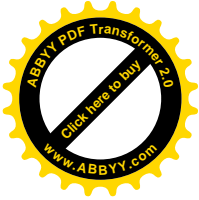
Varios trabajos han sido publicados por diferentes investigadores en cuanto a la selección, explotación y adquisición de compresores para la producción de aire comprimido, de los cuales se pueden mencionar algunos.

Los autores desarrollan una metodología para predecir el funcionamiento de los interenfriadores y postenfriadores de compresores en condiciones de servicio diferentes a las de diseño (PETER & BURKE, 1975). Dos años después, en otro trabajo se describen los tipos de redes que a su juicio de autor resultan los más prácticos para aplicarse en cualquier instalación de aire comprimido, desde el compresor hasta las “bocas de salida” de aire en toda la extensión de la instalación. En ese trabajo no se tiene en cuenta la estructura (arquitectura) de la planta, o local donde se desea instalar el sistema (CARNICER, 1977).

Posteriormente se publica un análisis de las características de los equipos compresores para realizar una selección preliminar del compresor en correspondencia con el tipo y tamaño adecuado (RICHAR NEERKEN, 1986).

En 1988 se expone como obtener la mejor distribución física de una planta para bombas y compresores con vista a economizar tuberías y estructuras, unido a la facilidad de operación y mantenimiento en instalaciones de unidades motrices y componentes auxiliares (KERN, 1988).

Otro autor recomienda la forma de elegir los aceites para la lubricación de los compresores y analiza los posibles riesgos de incendio por el uso de aceites inadecuados y el mal manejo del compresor (WINTERS, 1995). En los tiempos modernos existen



aceites especiales que aunque son relativamente caros, reducen casi al mínimo la posibilidad de incendios.

Con el desarrollo de la tecnología, otros autores (GONZÁLEZ & OTHER'S, 1997), exponen el cálculo de una red de tuberías para la distribución de aire comprimido donde recomiendan para instalaciones grandes, caídas de presión no mayores de 50 014 Pa ($0,51 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ó 0,5 bar), desde la central compresora hasta el punto de consumo más alejado. En las instalaciones modernas, las caídas de presión están en función de la longitud y la edad promedio del sistema.

No menos importante resulta el trabajo que se refiere al método para una adquisición correcta de compresores, teniendo en cuenta que la comparación para la selección entre diferentes ofertas, no se haga solamente sobre la base de aplicar la relación de eficiencias de trabajo como parámetros de comparación (EDWAR, 1998).

Asimismo se ha desarrollado una forma fácil de tomar las temperaturas de compresión usando un método gráfico, método muy práctico y eficiente a la hora de detectar pase de aire entre etapas de compresión (SISSON, 2000).

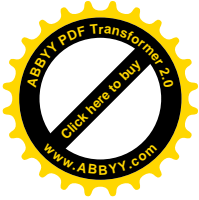
En cuanto al material que conforman las tuberías, actualmente se conocen diversos tipos que mejoran competitivamente el proceso de distribución de aire comprimido y minimizan las pérdidas por resistencias al paso del flujo de aire.

1.2. Fundamentos teóricos

Los fundamentos teóricos constituyen los elementos básicos sobre los cuales están sustentados los conocimientos científicos que hasta el momento se conocen sobre la tecnología estudiada y que determinan la medida en que se profundiza en el tema de investigación.

1.2.1. Aire

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Seco, es la parte compuesta solamente por nitrógeno y oxígeno, y el vapor de agua es lo que se denomina humedad. Posee dos estados extremos: la parte en que no hay absolutamente nada de vapor de agua y el aire saturado de humedad en el que la mezcla contiene todo el vapor de agua que puede absorber la parte seca a esa temperatura. El aire seco puede absorber más vapor si se calienta, y condensa agua líquida en forma de gotas si se enfría. Cuando



la condensación ocurre sobre una superficie sólida, se origina la condensación por goteo o rocío.

Como es conocido, el aire es vital para la vida en la Tierra y lo respiramos continuamente y por definición es una mezcla de gases incolora, inodora e insípida. Siempre está contaminado con partículas sólidas, como arenilla, hollín y cristales de sal. Su composición es relativamente constante desde el nivel del mar hasta una altitud de 25 km aproximadamente. Y una vez comprimido se convierte en un medio seguro y versátil para transmitir y almacenar energía (COPCO s.a).

1.2.2. ¿Qué es el aire comprimido?

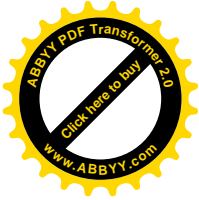
El aire comprimido no es otra cosa que el mismo aire del ambiente atrapado en un mecanismo donde se incrementa su presión -por la reducción del volumen- a través de un proceso mecánico (CONAE, s.a).

La compresión a temperatura constante se rige por la ley de Boyle - Mariotte. Si se comprime, éste se calienta. Si se reduce la presión del aire comprimido, éste se enfría. Una vez comprimido es un medio de trabajo limpio, seguro, simple y eficaz. No se producen humos de escape u otros productos derivados peligrosos cuando se usa el aire comprimido como energía y no es contaminante.

Cuando un compresor comprime mecánicamente el aire atmosférico, la transformación de la presión desde 10^5 Pa ($1,02 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$) hasta $41\,400\,000$ Pa ($422,28 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$), está determinada por las leyes de la termodinámica. Se afirma que un incremento de la presión supone un aumento de calor, y el aire en compresión crea un incremento proporcional al calor desprendido.

La ley de Boyle explica que, si se divide a la mitad un volumen de gas (aire) durante la compresión, se duplica la presión. La ley de Charles establece que el volumen de un gas cambia en proporción directa a la temperatura. Estas leyes explican que la presión, volumen y temperatura son proporcionales, se cambia una variable y también cambian las otras dos.

Cuando se aplica esto a un compresor, el volumen (o caudal) y la presión del aire se pueden controlar y aumentarse hasta un nivel adecuado al modo en que se necesite utilizar. Normalmente, el aire comprimido se utiliza en valores de presión de 10^5 Pa (desde $1,02$ hasta $422,28 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ o entre 1 y 414 bar) y con diferentes velocidades de



flujo, desde $0,1 \text{ m}^3/\text{min}$ (3,5 CFM – pies cúbicos por minuto) y superiores.(WIKIPEDIA).

1.2.2.1. Generalidades del aire comprimido

El aire comprimido constituye en realidad una forma de transporte de energía y su utilización se ha ido imponiendo paulatinamente, como ya se ha visto. Sería interesante investigar los motivos de tal evolución circunscribiendo el accionar a las características que éste presenta. Sería también oportuno anticipar la posibilidad de que existan tanto características deseables como indeseables.

Características del aire comprimido

- ✓ Puede almacenarse en recipientes.
- ✓ Aún comprimido el aire no posee características explosivas, esta particular situación hace de la técnica neumática una aliada fundamental en casos de seguridad. Además no existen riesgos ante chispas o cargas electrostáticas.
- ✓ La velocidad de los actuadores neumáticos es razonablemente alta (términos industriales) y su regulación es posible realizarla fácilmente y en forma continua (con ciertas restricciones).
- ✓ Los cambios de temperaturas no modifican su prestación en forma significativa y no produce calor por sí mismo.
- ✓ Normalmente se trata de una técnica limpia (desde el punto de vista microscópico), característica que unida a la seguridad, proporciona una herramienta eficaz en los procesos industriales.
- ✓ La limpieza característica se va perdiendo a medida que se “mira” el aire en detalle. Efectivamente, en dimensión microscópica, el aire presenta impurezas que para su uso satisfactorio, deben eliminarse. Es decir: el aire tal cual se toma de la atmósfera no sirve, motivo por el cual se debe someter a ciertos tratamientos que se conocen como preparación del aire comprimido.
- ✓ El ruido es una característica de los sistemas de aire comprimido (succión de aire). Este inconveniente puede evitarse razonablemente utilizando silenciadores.

1.3. Sistema industrial de aire comprimido

Un sistema típico de aire comprimido está compuesto por los siguientes subsistemas:

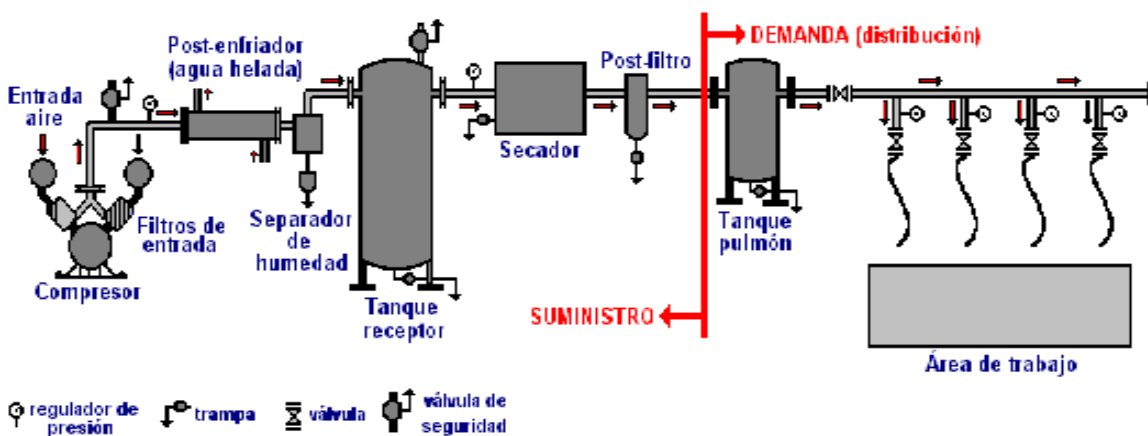
- Compresor, dispositivo mecánico que toma el aire ambiente y le incrementa su presión.
- Motor primario, encargado de mover al compresor.
- Controles, que regulan la cantidad y presión del aire producido.
- Equipos de tratamiento del aire, para remover contaminantes.
- Sistema de almacenamiento, que mejore el comportamiento y eficiencia sistema.
- Sistema de distribución, para transportar el aire hasta donde se necesita.
- Accesorios, para asegurar el funcionamiento adecuado del sistema.

1.3.1. Compresores

Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos, máquinas, mandos neumáticos y otros consumidores se alimentan desde una estación central. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

Son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión. En esta última característica precisamente, se distinguen de los soplantes y ventiladores que manejan grandes cantidades de fluidos compresibles (aire por ejemplo) sin modificar sensiblemente su presión.

Muchos compresores modernos se suministran integrados en una sola unidad, que incluye el compresor, motor primario y el resto de los componentes y accesorios, montados en un solo bastidor y recubiertos para atenuar el ruido y mejorar la estética como se observa en la figura 1.1.



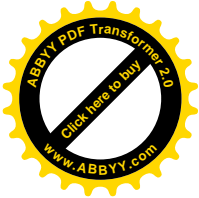


Figura 1.1. Esquema de una instalación convencional de aire comprimido.

Fuente: (CONAE, s.a)

1.3.2. Clasificación general de los Compresores

Como se observa en la figura 1.2, existen dos tipos básicos de compresores: los de desplazamiento positivo y los dinámicos. Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de construcción.

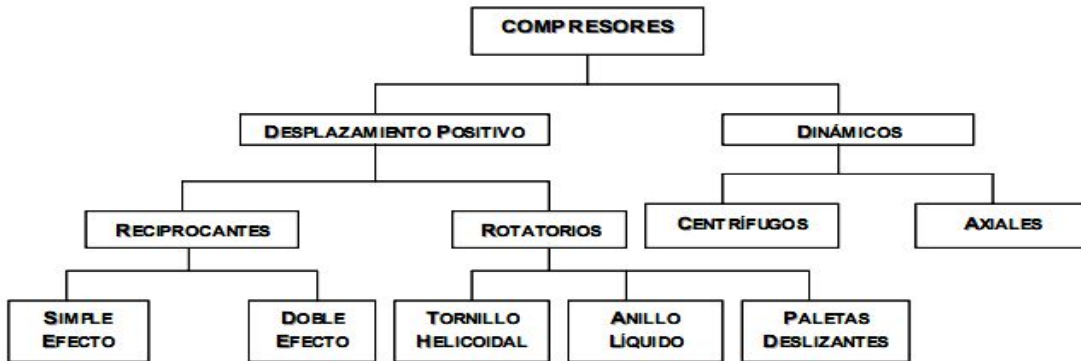


Figura 1.2. Clasificación de los Compresores.

Fuente: (NORGREN, s.a)

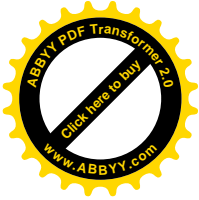
El primero trabaja según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen.

El otro trabaja según el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).

En los primeros una cantidad dada de aire o gas es atrapada en una cámara de compresión, cuyo volumen es mecánicamente reducido, causando la correspondiente elevación de la presión de la sustancia de trabajo antes de ser descargada. En este tipo de compresor, a velocidad constante, el flujo de aire permanece esencialmente invariable con cambios en la presión de descarga. Los compresores dinámicos le entregan energía cinética a un flujo continuo de aire mediante impelentes que rotan a altas velocidades. Esta energía cinética es transformada en presión en el propio impelente y en las volutas de descarga o difusores.

1.4. Accesorios de un sistema de aire comprimido

En un sistema de aire comprimido se emplean diferentes tipos de accesorios para eliminar contaminantes, tales como polvo, lubricante y agua para mantener la operación



correcta del sistema y garantizar la presión y calidad adecuada del aire. Los accesorios incluyen: filtros, separadores, secadores, Inter-enfriadores, post-enfriadores, recuperadores de calor, lubricadores, reguladores de presión, recibidores de aire, trampas y drenajes automáticos.

1.4.1. Filtros de succión

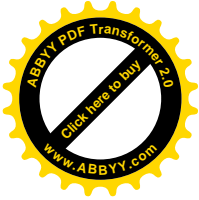
Para asegurar un buen funcionamiento del compresor, este deberá llevar siempre un filtro de aspiración eficaz. Este dispositivo es utilizado para eliminar las impurezas del aire antes de la compresión con el fin de proteger el equipo compresor. De otra forma, los abrasivos que hay en el aire (ambiente) llegarían a la unidad y podrían causar desgaste excesivo en los cilindros, anillos, pistón, cojinetes, entre otros. Protegen al compresor de las partículas suspendidas en el aire ambiente. No obstante, se requieren otros filtros para proteger a los accesorios situados del lado de la descarga y a los equipos de uso final.

Un buen filtro deberá cumplir los siguientes requisitos: gran eficacia de separación de impurezas, buena capacidad de acumulación, baja resistencia al flujo de aire y construcción robusta entre otros.

1.4.2. Sistema de enfriamiento

El proceso de compresión es un proceso politrópico que eleva la temperatura del aire. Como resultado se requiere de un sistema de enfriamiento del compresor que evite el sobrecalentamiento de sus partes, bien mediante aire, agua o lubricante.

Los compresores reciprocantes de menos de 100 hp son normalmente enfriados por aire, soplado por un ventilador integrado en la propia polea de accionamiento del mismo. Los compresores reciprocantes de mayor capacidad incluyen sistemas de enfriamiento por agua para las camisas y cabezas de los cilindros. Los compresores rotatorios inyectados con aceite emplean el propio aceite para remover la mayor parte del calor de compresión. En el caso de compresores enfriados por aire se utiliza generalmente un radiador de aceite para enfriarlo antes de ser reinyectado.



- a. **Inter enfriador.** La mayoría de los compresores multietapas emplean enfriadores intermedios para enfriar el aire entre etapas, separar humedad y reducir el consumo de potencia.
- b. **Pos enfriador.** Se instalan a la salida de la última etapa de compresión para reducir la temperatura del aire para condensar, separar y drenar el vapor de agua que no haya sido eliminado en los enfriadores intermedios. Casi todos los sistemas industriales los poseen, salvo aquellos en que el aire caliente no resulta perjudicial, tales como procesos de forja o fundición.

1.4.3. Recuperadores de calor

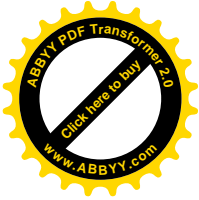
Como se señaló anteriormente, los sistemas industriales de compresión de aire generan importantes cantidades de calor, el que puede ser parcialmente recuperado para propósitos útiles. Más del 80 % del consumo de la potencia utilizada por el compresor se convierte en calor que se puede recuperar para producir agua o aire caliente.

De acuerdo con la cantidad de calor que se genere, se adoptará la refrigeración más apropiada. En compresores pequeños, las aletas de refrigeración se encargan de irradiar el calor. Los compresores mayores van dotados de un ventilador adicional que evacua el calor.

Cuando se trata de una estación de compresión que funcione con una potencia a más de 30 kW, no basta la refrigeración por aire. Entonces los compresores van equipados de un sistema de refrigeración por circulación de agua en circuito cerrado o abierto. A menudo se temen los gastos de una instalación mayor con torre de refrigeración. No obstante, una buena refrigeración prolonga la duración del compresor y proporciona aire más frío y en mejores condiciones. En ciertas circunstancias, incluso permite ahorrar un enfriamiento posterior del aire u operar con menor potencia.

1.4.4. Filtros

Incluyen los filtros de partículas, así los de adsorción para remover lubricante y humedad. La filtración debe realizarse solo hasta el nivel requerido para reducir la caída de presión y el consiguiente consumo de potencia. Los elementos filtrantes deben reponerse en función de la caída de presión o al menos anualmente.



1.4.5. Lubricadores

Los lubricantes se emplean en los compresores para enfriar, sellar y lubricar las partes en movimiento. En los lugares cercanos a algunos equipos de uso final, tales como herramientas neumáticas, se requiere también de la instalación de lubricadores.

1.4.6. Controladores de flujo

Además de regular la presión, estos dispositivos permiten la regulación del flujo de aire de acuerdo a las variaciones de demanda.

1.4.7. Recibidores de aire (Tanques de almacenamiento)

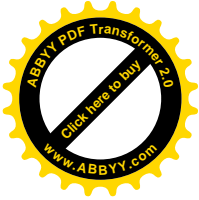
Parte integrante de todo sistema de aire comprimido son unos o varios depósitos de almacenamiento para el fluido comprimido; cuyas principales funciones son: almacenar aire para garantizar las demandas picos superiores a la capacidad del compresor, contribuir al enfriamiento y separación del condensado y amortiguar las pulsaciones del compresor. Los recibidores son especialmente efectivos en sistemas con amplias variaciones en la demanda.

1.4.8. Trampas y drenajes

En las redes de distribución de aire comprimido se utilizan drenajes automáticos o trampas para prevenir fugas de aire a través de válvulas. Estos drenajes automáticos permiten la evacuación de condensado pero impiden la salida del aire. Pueden ser mecánicos, del tipo de flotador, o eléctricos, mediante válvulas solenoides que operan en ciclos predeterminados, mediante sensores de nivel para controlar la apertura del drenaje.

1.5. Sistema de distribución

El sistema de distribución de aire une los diferentes componentes del sistema para llevar el aire comprimido hasta los puntos de uso con la menor caída de presión. La configuración del sistema de distribución depende de las características y necesidades de la planta, pero generalmente consiste de una red de tuberías principales, ramales, válvulas y mangueras de aire. La longitud del sistema debe ser minimizada y las tuberías deben tener el diámetro adecuado al flujo que circula por ellas para reducir la caída de presión. En muchos casos se emplean sistemas con las líneas principales en forma de anillo cerrado, y todas las líneas con pendiente hacia los puntos de drenaje.



1.6. Requerimientos de una red de aire comprimido

El grado de pureza del aire comprimido puede ser decisivo para el correcto funcionamiento de los dispositivos neumáticos. Los componentes que se utilizan, ya sean válvulas, cilindros, reguladores y otros, hacen que su duración y buen funcionamiento cotidiano, dependan de la calidad de dicho fluido.

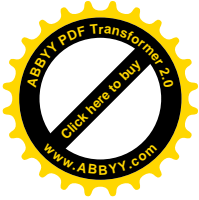
Para obtener cierto grado de calidad, es preciso dotar al compresor de una serie de elementos que filtren el aire, lo enfríen y después libere de alguna forma la humedad que contiene.

El proceso no termina ahí, sino que continúa a lo largo de la instalación, y hasta el propio punto de consumo. En los equipos neumáticos convencionales el pequeño porcentaje de aceite que posee el aire no representa problema alguno. Lo que si lo representa y muy grave, es el contenido de humedad que el aire contiene y que no se logra eliminar totalmente del sistema. Para eliminar el agua restante se instalan en el fondo de los depósitos y acumuladores intermedios, llaves de purga, además de colectores de condensado en determinados puntos de la red.

En algunos casos, incluso a la entrada del equipo se instala un grupo de tamaño reducido que purifica el aire definitivamente, filtrándolo nuevamente y eliminando la humedad que todavía contiene, además de lubricarlo deliberadamente con aceite previsto para este fin.

Caída de presión en redes de distribución de aire comprimido

Las fugas de aire comprimido, el exceso de consumo, la forma de la red de tuberías de aire y su rugosidad interna originan pérdida de energía. Además el uso inadecuado de accesorios en líneas, tales como filtros, trampas, llaves, mangueras y acoples, se traducen en considerables caídas de presión. Un flujo típico de aire comprimido a través de una tubería recta de hierro o acero, se considera turbulento para los efectos del cálculo. En estas condiciones, es imposible aplicar fórmulas que no sean experimentales. Cuando se requiera seleccionar la tubería para la línea principal y líneas de alimentación de aire comprimido, es necesario que la tubería cumpla con las siguientes condiciones:



1. Caída de presión en la línea principal $\Delta P \text{ máx} = 7 \text{ kPa}$ (0,07 bar).
2. Caída de presión en la línea secundaria $\Delta P \text{ máx} = 3 \text{ kPa}$ (0,03 bar).

1.7. Preparación del aire comprimido

En la práctica se presentan muy a menudo los casos en que la calidad del aire comprimido desempeña un papel primordial. Las impurezas en forma de partículas de suciedad u óxidos, residuos de aceite lubricante y humedad, dan origen muchas veces a averías en las instalaciones y a la destrucción de los elementos neumáticos.

Mientras la mayor separación del agua de condensación tiene lugar en el separador, después de la refrigeración, la separación fina, el filtrado y otros tratamientos del aire comprimido se efectúan en el puesto de aplicación. Hay que dedicar especial atención a la humedad que contiene el aire comprimido.

El agua (humedad) llega al interior de la red con el aire que aspira el compresor. La cantidad de humedad depende en primer lugar de la humedad relativa del aire al ser succionado, que a su vez depende de la temperatura y de las condiciones climatológicas.

La humedad del aire

Es la cantidad de agua presente en el mismo y generalmente es medido en porcentaje. El aire que nos rodea siempre contiene una cantidad mayor o menor de humedad. Esta depende de la temperatura en cada momento. Por ejemplo, el aire saturado de vapor de agua al 100 % a una temperatura de + 25 °C puede contener aproximadamente 23 g/m³ .

1.8. Principales variables que caracterizan el transporte del aire comprimido por tuberías

Velocidad del gas: Esta es importante si se tiene en cuenta que las pérdidas de presión son directamente proporcionales a la velocidad del fluido en la tubería, y además debe ser lo suficientemente baja para evitar el arrastre de condensado a los consumidores.

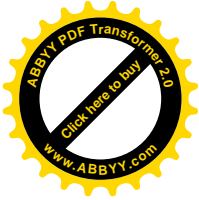
Valores de velocidades del aire recomendados en redes de tuberías:

Aspiración, de 5 a 7 m/s .

Colectores principales, menor de 8 m/s .

Tuberías secundarias, de 10 a 15 m/s .

Manguera, menor de 30 m/s .



Diámetro de las tuberías: El dimensionado de los conductos es de suma importancia, las pérdidas de presión están directamente relacionadas con el diámetro de la tubería; se ha establecido que para grandes instalaciones las pérdidas de presión desde la central compresora hasta el consumidor más alejado sea como máximo $0,51 \text{ kg/cm}^2$.

Presión de trabajo: Este parámetro influye directamente en el trabajo realizado por el compresor para la compresión de aire por cada m^3 que se genera. A menores presiones de trabajo el consumo de energía será menor, y menor será el desgaste del compresor, por esta razón se debe trabajar a la presión requerida por los consumidores.

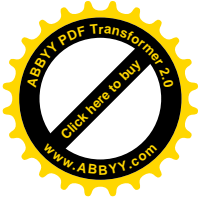
Caudal del compresor

Por caudal se entiende la cantidad de aire que suministra el compresor a la presión dada. Existen dos conceptos, el caudal teórico y el caudal efectivo o real. En el compresor de émbolo oscilante, el caudal teórico es igual al producto del tiempo del recorrido del cilindro por velocidad de rotación. El caudal efectivo depende de la construcción del compresor y de la presión. En este caso, el rendimiento volumétrico es muy importante. Es interesante conocer el caudal efectivo del compresor, solo este es el que acciona y regula los equipos neumáticos.

El caudal se expresa en m^3/min ó m^3/h (flujo volumétrico), también se puede expresar en kg/min ó kg/h (flujo másico). No obstante, son numerosos los fabricantes que solamente indican el caudal teórico.

Para seleccionar un compresor adecuado para la instalación, se deberá contemplar la hipótesis de consumos que se considere que va a ser la más habitual. Para establecer una hipótesis de consumos reales hay que conocer con cierto detalle el uso habitual que se hace de todas las unidades consumidoras que se alimentan del sistema. Por lo tanto, el caudal depende de los siguientes factores:

- Cantidad de unidades consumidoras y consumo de aire de cada una.
- Factor de simultaneidad.
- Pérdidas por desgaste de las unidades consumidoras y por fugas en la red.
- Duración de la conexión de las unidades consumidoras.
- Temperatura del gas a la entrada del compresor.



1.9. Análisis teórico de la revisión bibliográfica

Tomando como base los conocimientos teórico prácticos sobre el tema, para poder identificar y determinar las irregularidades del sistema y la búsqueda de los antecedentes teóricos y empíricos sobre la práctica real en cuanto a la pobre información científica existente referente al tratamiento de sistemas de generación de aire comprimido, cabe mencionar que las directrices fundamentales en las que se basan las evaluaciones de los mismos, están caracterizadas por la rápida solución de los problemas técnicos y productivos, al punto de violar los principios teórico - prácticos que rigen la tecnología (ampliación según las necesidades productivas), ocasionado en muchos casos, por la falta de recursos disponibles o el difícil acceso a las piezas de repuesto.

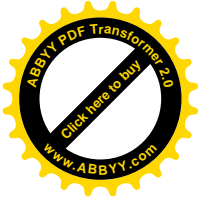
De esta manera es posible establecer las direcciones de estudio sobre los parámetros que determinan la eficiencia energética de los sistemas de aire comprimido.

Al procesar la información y como resultado de la interpretación de los fundamentos teóricos que definen la tecnología es posible pronosticar el comportamiento del sistema, que para el caso cuenta con un promedio de vida de 10 a 15 años de explotación continua, hecho que agudiza las pérdidas de energía del mismo y aumenta las posibilidades de mejoras, sustentado en la clara comprensión de los fundamentos del mismo.

Fundamentación teórica preliminar

A partir del análisis de la fundamentación teórica de los parámetros que determinan la eficiencia de los sistemas de aire comprimido y los estudios evaluativos de los mismos, se puede interpretar que están igualmente determinados por el conocimiento científico técnico relativo a la tecnología y los estudios disponibles sobre el tema.

El estudio de los trabajos referentes al ahorro de energía en sistemas de aire comprimido (CORONA Y OTROS, 2008), (SOLUTIONS, s.a) y (EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD, s.a), permite, a partir de la actual necesidad de ahorrar portadores energéticos, asumir correctamente que los sistemas de aire comprimido son sensibles a los altos costos, debido a gastos energéticos. De ahí que sea necesaria la evaluación de



los sistemas para localizar oportunidades de mejora y así revertir las situaciones desventajosas que se presentan.

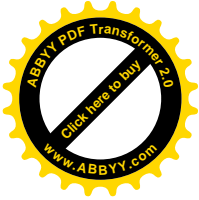
1.10. Justificación del proyecto

Debido a la gran cantidad de equipos neumáticos con que cuentan los procesos productivos de las industrias del níquel, y a los altos requerimientos de los mismos, los sistemas de aire comprimido desempeñan un papel de vital importancia en estos procesos, así como en las demás áreas de servicios. Por este motivo se hace necesario que la disponibilidad de estos sistemas sea alta, y que tanto los equipos principales de generación de aire comprimido como los equipos auxiliares, se mantengan en las mejores condiciones posibles y que cumplan en todo momento con los requerimientos de consumo y presión adecuados de acuerdo a las necesidades que los consumidores exijan.

La empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” considera que en estos momentos su red de distribución de aire comprimido presenta mal diseño, debido principalmente a la falta de su estudio y caracterizada por el crecimiento inorgánico de acuerdo a las necesidades que se han presentado a lo largo de las diferentes etapas productivas por las que ha transitado la empresa.

Elementos que han originado la utilización de tuberías de ampliación sin verificar los diámetros necesarios. Por falta de presupuesto para adquirir nuevos equipos compresores, se han interconectado líneas diferentes para lograr garantizar las demandas de los consumidores, situaciones que en estos momentos se traducen en mal funcionamiento del equipamiento al que llega el servicio y que es provocado por las caídas de presión excesivas en determinadas circunstancias (cuando aumenta el coeficiente de simultaneidad o cuando sale de servicio determinada línea como consecuencia de avería o mantenimiento), unido al elevado contenido de humedad que existe en el interior de las redes de distribución, humedad que no puede ser evacuada como producto del ineficiente sistema de evacuación de condensado que se origina. Además del flujo insuficiente que llega a los consumidores como consecuencia de estrangulaciones, mal dimensionado de las tuberías de ampliación, cortocircuitos y fugas que superan el 10 % de la capacidad de generación.

Altos costos de producción, la empresa desea disminuir los costos por consumo de energía (portadores energéticos) con el fin de disminuir los costos de producción, puesto

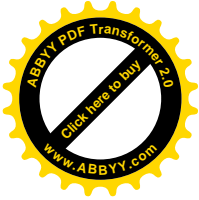


que una red mal diseñada, cuenta con pérdidas de carga y fugas, lo que trae como consecuencia que sea necesario el funcionamiento de más de los equipos compresores previstos para suplir las demandas en determinadas situaciones, lo que provoca un consumo de electricidad superior al debido, acto que ocasiona el aumento de los costos de energía.

En trabajos anteriores se han desarrollado evaluaciones de sistemas de aire comprimido, donde se evidencia que el sistema de aire comprimido presenta deterioro general en todos los elementos que lo forman, partiendo desde el mal estado técnico operativo de los compresores, como de las líneas de distribución (GALANO M, 2004). Ese trabajo se refiere a un sistema de trabajo periódico por lo que se desarrolla una metodología de análisis (corridas experimentales) que no se puede aplicar de forma generalizada en los sistemas de aire comprimido, y que no se ajusta al sistema de estudio por ser una instalación de producción continua.

En el trabajo evaluativo de un sistema en tres etapas, la etapa actual, etapa de aumento de producción y la etapa futura de una empresa productora de cervezas, se concluye la necesidad de adquirir equipos compresores para poder garantizar la demanda en las etapas de aumento de producción y la etapa futura de la empresa, reestructurando y redimensionando las redes de distribución (ALONSO MORALES, 2009).

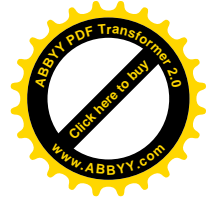
En ese trabajo, el autor realizó la simulación de los flujos de aire en tuberías, demostrando la necesidad de inversión en cada etapa, por lo que se diferencia de este trabajo en las direcciones de análisis del sistema. Centrando especial atención a los elementos que determinan las posibilidades de ahorro de energía en consecuencia con la actual necesidad del ahorro de portadores energéticos por la que atraviesa el país. El estudio del sistema de aire comprimido brinda la oportunidad de establecer los parámetros que lo afectan, para luego determinar según los criterios estudiados (fundamentos teóricos) y las experiencias de otros trabajos, las alternativas o posibles soluciones para incrementar la eficiencia y rentabilidad del mismo. Los resultados que se obtengan sirven de base para asimilar conocimientos concretos sobre la situación actual que presenta la tecnología de aire comprimido en la empresa, logrando con ello, el planteamiento de recomendaciones (propuestas) para mejorar el sistema.



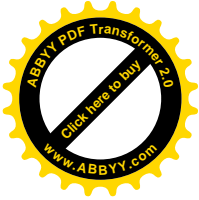
1.11. Conclusiones del capítulo

Como ha quedado evidenciado por el análisis de la información bibliográfica y los aspectos teóricos que caracterizan la tecnología de aire comprimido, es posible revalidar los criterios introductorios y la hipótesis definida, referentes al problema que se persigue resolver en este proyecto, señalando que:

1. No existe en la instalación, la instrumentación necesaria para conocer el consumo real que reporta cada consumidor. Quedando en los términos de producir para consumir, lo que no permite controlar el sobreconsumo y las pérdidas energéticas que se generan.
2. El sistema a tratar presenta alta complejidad en el análisis de los parámetros con el fin de lograr el mejor funcionamiento de la instalación, a causa de las limitaciones económicas por las que atraviesa el país.



CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES



CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES

Durante los años que abarcan las investigaciones científicas, en todos los campos, se ha hecho evidente que en la gran mayoría de los casos, los métodos teóricos difieren de la realidad práctica. Es por ello que se necesita, en muchas ocasiones, validar la teoría con la práctica para llegar a conclusiones precisas que permitan obtener los resultados esperados.

Para la realización de este trabajo se creó una base de datos sobre el comportamiento de las distintas variables que determinan la calidad y eficiencia de la tecnología de aire comprimido en la instalación de estudio, así como los factores que inciden sustancialmente en el ahorro de portadores energéticos.

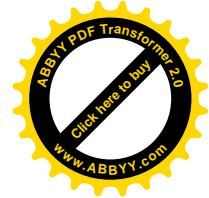
La metodología que se propone a continuación, pretende solucionar la problemática planteada sobre el sistema de aire comprimido de la industria “Comandante Ernesto Che Guevara”. Este capítulo tiene como objetivo exponer los fundamentos metodológicos para realizar la evaluación del sistema, determinar la influencia de los principales parámetros que caracterizan el proceso tecnológico y realizar propuestas que se traduzcan en el ahorro energético del sistema. A continuación se exponen las herramientas y metodologías de análisis empleadas durante el trabajo.

2.1. Metodología empleada

Para poder desarrollar un buen estudio del sistema de aire comprimido se siguieron tres metodologías centrales:

Recolección y manejo de datos; descripción de la forma de análisis y etapas de trabajo de terreno, organización de la supervisión, calidad de los datos primarios, modelos de recolección, descripción del flujo de la información, captura de datos (entrada a la computadora, formas de validación), forma y tiempo de conservación y procesamiento de la información.

Se utilizó la recopilación de datos, mediante elaboración de listados tanto en lo que respecta a equipos de generación y tratamiento del aire en la parte de suministro, como



la maquinaria que utiliza sistemas neumáticos para su operación en la parte de la demanda, así como también la elaboración de diagramas del sistema de distribución de aire con sus distintos ramales.

Con el objetivo de alcanzar un conocimiento más amplio de los problemas que se pueden presentar en un sistema de aire comprimido, se recurrió al uso de la técnica de análisis de falla, mediante la elaboración de un árbol de fallas, obteniendo con esto una ayuda para poder determinar las probables causas que lo afectan y plantear las posibles soluciones para éstas.

2.2. Características de la materia prima (aire atmosférico)

El aire del ambiente es, por así decirlo, la materia prima en los sistemas de aire comprimido. Está compuesto básicamente de nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), argón (0,9 %) y trazas (0,1 %) de bióxido de carbono, neón y helio; físicamente es inodoro, incoloro y no tiene sabor (COPCO, s.a).

En la tabla 2.1 se muestran las características del aire atmosférico.

Tabla 2.1. Características del aire atmosférico

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES
Presión de trabajo	110 kPa (1,02 kg/cm ²)
Temperatura	28 – 31 °C
Humedad relativa	73 – 85 %

2.3. Descripción de la situación actual del sistema

En esta etapa se actualizaron y elaboraron (en cada caso) los planos del sistema de aire comprimido, los que permitieron conocer la ubicación de las redes para verificar y determinar los diámetros de las tuberías, localizar los equipos y accesorios conectados, sistemas de purga etc., así como conocer sus condiciones. Por otra parte permitió conocer la estructura del sistema, incluyendo el número de compresores y áreas de compresión, se caracterizaron los tipos de aires que se producen además de conocer el sistema en general. Para la realización de los planos y diagramas se utilizaron el editor de dibujo Paint y el programa Auto CAD, este último tiene el formato de trabajo DWG,



el cual es compatible con muchos otros, lo que lo hace una herramienta versátil a la hora de compartir archivos entre programas.

El método utilizado fue el estudio de los planos existentes, recorrido y observación directa, entrevistas con el personal de mantenimiento y realizando anotaciones y medidas del sistemas.

2.4. Distribución de aire comprimido por tuberías

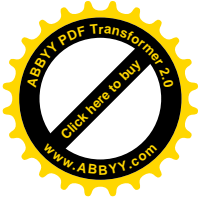
En este aspecto se definieron los procesos y plantas que consumen aire comprimido, puntualizando las necesidades de cada una y sus consumos en un período de tiempo determinado para conocer las tendencias del consumo en determinadas horas del día. Las tendencias de los índices de consumo definen las posibles causas del comportamiento de los mismos según se considere. El control se estableció en horarios diurnos debido a que el funcionamiento de la gran mayoría de los equipos solo ocurre en este intervalo de tiempo.

Para esto se entrevistaron a los tecnólogos del sistema de aire comprimido, además de contar con las fichas técnicas del equipamiento neumático al alcance. La técnica empleada fue la recopilación de información y procesamiento de datos.

2.4.1. La red actual

En la red, se determinó que materiales se emplearon para las tuberías según el diseño original con el fin de realizar una comparación con los materiales modernos y valorar sus deficiencias técnicas actuales. La comparación se realizó utilizando las tablas comparativas obtenidas de Internet, aportadas por instituciones vanguardias en el tratamiento de sistemas de aire comprimido entre las cuales se encuentran: NORTEN, KAESER y COPCO; disponibles en (NORTEN, s.a), (KAESER, s.a) y (COPCO, s.a). Todas son herramientas útiles en la selección de materiales para tuberías en sistemas modernos de aire comprimido.

De igual manera se definieron los materiales empleados en las tuberías de ampliación, en las distintas situaciones que se han presentado en los últimos años. En los casos que se consideró necesario se recalcularon los diámetros, sustentado en que todo movimiento de un fluido por el interior de una tubería produce una pérdida de presión debido a la rugosidad y diámetro asociado, según los principios de la mecánica de fluidos y para ello se utilizó la siguiente ecuación.



$$\Delta p = \frac{\beta}{R \cdot T} \cdot \frac{v^2}{D} \cdot L \cdot p$$

Siendo:

- Δp : caída de presión en Pa .
- p: presión en Pa .
- R: constante del gas, para aire 29,27.
- T: temperatura absoluta (t + 273), siendo t la temperatura del aire en el interior de la tubería, aproximadamente, la temperatura ambiente.
- D: diámetro de la tubería en mm .
- L: longitud de la tubería en m .
- v: velocidad del aire en m/s .
- β : Grado de resistencia, que es función del caudal másico.

Las pérdidas de presión en accesorios (válvulas, T, codos, etc.), a efectos del cálculo, y con la misión de encontrar un resultado rápido con una aproximación aceptable, basta añadir, a la longitud propia de la tubería que se proyecte, un suplemento de longitud de tubería que compense las pérdidas de presión ocasionadas por dichos elementos.

Las resistencias de los elementos estranguladores (válvula de cierre, válvula esquinera, pieza en T, compuerta, codo normal y otros) se indican en longitudes supletorias. Se entiende por longitud supletoria la longitud de una tubería recta que ofrece la misma resistencia al flujo que el elemento estrangulador o el punto de estrangulación. La sección de paso de la “tubería de longitud supletoria” es la misma que la tubería.

La caída de presión para tubos rectos se calcula mediante la fórmula antes expuesta o por los nomogramas de las figura 2.1 y 2.2 (ALONSO MORALES, J. A. 2009). Se une la línea de longitud (A) con la línea de caudal (B), cruzando el eje 1 (C). Luego se une la línea del diámetro nominal (D) con la línea de presión de trabajo (E) hasta cruzar el eje 2 (F) y se busca la intersección entre el eje1 y 2, obteniéndose la caída de presión en el eje G

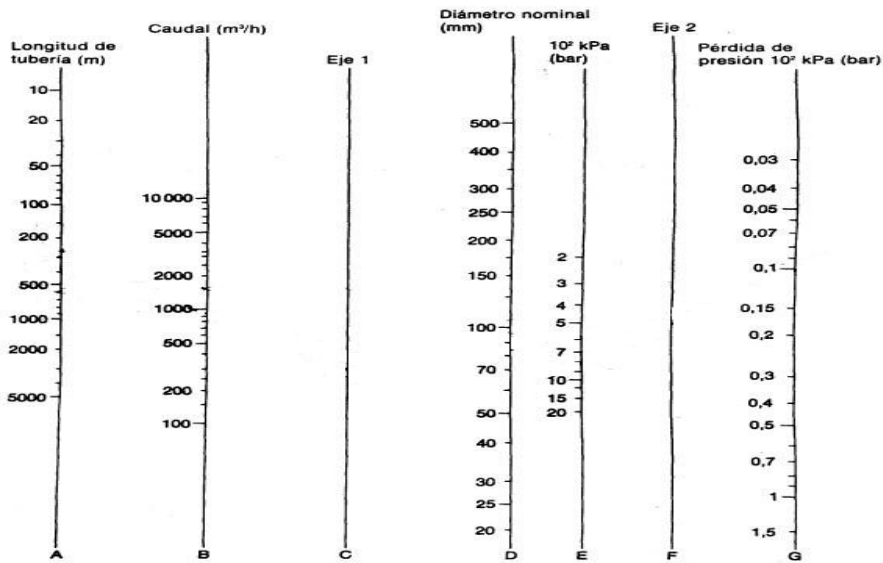


Figura 2.1. Nomograma para determinar caudal.

Se hace coincidir el diámetro nominal con la línea indicativa de la pieza, obteniendo la longitud supletoria. Esta longitud se suma a la longitud inicial y se repite el procedimiento anterior, obteniendo finalmente la caída de presión real.

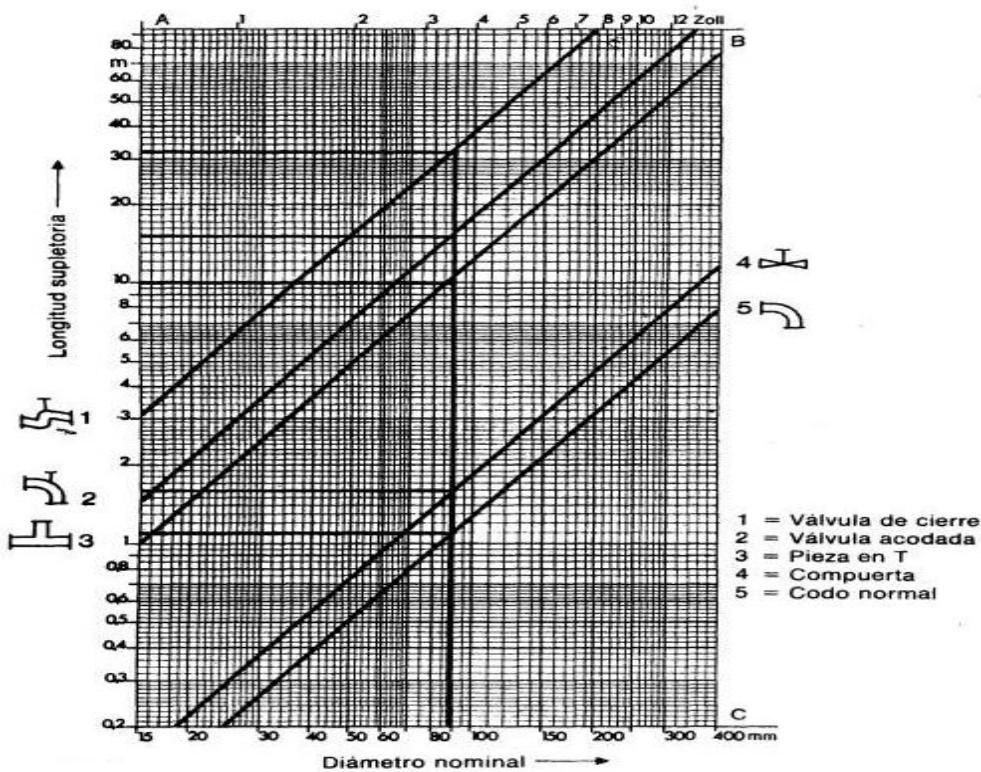


Figura 2.2. Nomograma para determinar longitud supletoria.

Por otra parte se investiga la demanda de aire a la que está expuesto el sistema y se valora si las redes están en condiciones de transportarlas hasta sus respectivas áreas de



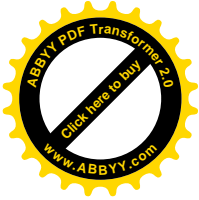
consumo. Se averigua además, la capacidad de generación de aire comprimido y se realiza un balance general con el fin de determinar el aire excedente según los planes de producción planificados por el departamento de economía, para así conocer la energía eléctrica necesaria para generar el mismo y que se traduce en pérdidas para el sistema, lo que repercute negativamente en los costos de la empresa.

Un balance es el análisis cuantitativo de lo que entra y sale de un sistema determinado, así como de las transformaciones que generalmente ocurren en el transcurso de entrada con respecto a la salida. Estos pueden ser tanto de masa como de energía y están fundamentados en que la sumatoria de toda la materia que entra es igual a la sumatoria de toda la materia que sale (Principio de conservación de la materia). Cuando la materia sale del sistema, puede salir de igual manera a la que entró o transformada, la particularidad es que ni se multiplica ni se pierde, solo se transforma.

Para el caso, la energía proviene del aire, el cual entra al sistema desde el momento de la etapa de compresión y sale del mismo al ser utilizado por los consumidores. Según la teoría de balance, al aplicarla a estos sistemas, se puede plantear que la cantidad de aire que producen los compresores es igual al que se consume en los procesos tecnológicos de la empresa, además del aire que no es utilizado en tecnología pero que igualmente se produce y consume (aire de transporte neumático, de servicio y de instrumentación). De ahí que todo el aire excedente que pueda existir constituye pérdidas generadas por el consumo no regulado del equipamiento neumático o por el mal uso del aire comprimido, e influye en el sobreconsumo energético de los compresores para suplir esas demandas (demanda artificial). Todo esto, ligado a las pérdidas que se originan en las tuberías por las que se transporta el aire (fugas) desde las casas de compresores hasta los puntos de consumo, y que inevitablemente están presentes en todo sistema de aire comprimido.

Existen valores admisibles para estas pérdidas, pero influyen de igual manera en el consumo de energía eléctrica de los compresores y se traduce en el incremento de costos, referidos al petróleo equivalente utilizado para generar la electricidad.

En esta etapa se realizó un trabajo de campo (recorrido del sistema) con el objetivo de realizar un inventario de fugas para poder determinar el porcentaje de pérdidas que representan para el sistema, se contabilizaron las secciones de tuberías que se han implementado y se evaluaron cada una de ellas.



El balance se realizó según los métodos utilizados en la empresa (capacidad de generación contra ficha técnica del equipamiento neumático existente).

2.5. Diagnóstico del sistema

La finalidad del diagnóstico fue evaluar el estado actual del sistema, partiendo de los factores que influyen sobre la calidad del proceso de generación de aire. Es importante señalar que los parámetros que definen el estado de la instalación están directamente relacionados con el estado técnico y operativo de los compresores, accesorios y redes. El diagnóstico estuvo encaminado en estas tres direcciones por lo que señalaron las deficiencias existentes en cada una.

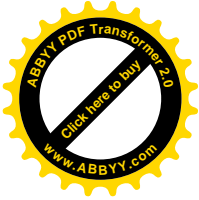
El desarrollo del proyecto se realizó en la etapa actual y considerando los cambios que se han realizado sobre el diseño original del sistema, en correspondencia con la ampliación de la empresa. Además, se analizaron las diferentes áreas de producción y generación que se encuentran actualmente sin realizar ningún tipo de modificación. Se realizó un estudio en cuanto a la ubicación de equipos compresores debido a la desaparición de la antigua planta de gas (actualmente no existe).

Se consideraron las obsolescencias, poder adquisitivo de piezas de repuesto, reparaciones capitales y las posibilidades de instalación de nuevo equipamiento. El sistema de aire comprimido se evaluó en correspondencia con las previsiones de crecimiento a mediano y largo plazo.

En el caso de los compresores, se determinó si garantizan las necesidades de consumo de la empresa y su creciente ampliación, apoyándonos en sus caudales nominales para definir sus limitaciones productivas en un momento dado. Se analizaron sus deficiencias técnicas, nivel de automatización con el fin de la humanización del trabajo, frecuencia de roturas, disponibilidad de piezas de repuesto así como el estado operativo por el prolongado tiempo de exploración (25 años).

Se definieron los accesorios necesarios para cada tipo de aire. Se contabilizaron las fugas por desgaste, acoplamientos y ponches, además de la disponibilidad de piezas de repuesto o el acceso a ellas.

En las redes se enfocaron los esfuerzos en determinar las dimensiones de las tuberías y definir cómo influyen estas en las caídas de presión del sistema. Por otra parte, se evaluaron las particularidades de la existencia de tramos de tuberías que actualmente no



están en uso. Y por último se definieron las posibles oportunidades de mejora, según el progresivo crecimiento de la empresa en los últimos tiempos.

Para realizar del diagnóstico se desarrolló el procedimiento siguiente:

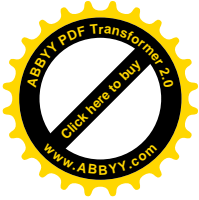
- Se examinó el desempeño de los compresores, partiendo del prolongado tiempo de explotación y la disponibilidad de piezas de repuesto o el acceso a ellas.
- Se estudiaron las áreas de compresión y estado de los equipos compresores.
- Se identificaron las aplicaciones de los distintos tipos de aire, atendiendo a los propios requerimientos de operación de los equipos consumidores.
- Se recorrieron las redes, con el objetivo de identificar y cuantificar las fugas en el sistema, así como determinar la confiabilidad de la red de distribución y constatar las ampliaciones en los últimos tiempos.
- Se desarrolló el Balance General de aire.
- Por último se procedió al levantamiento documentado de las oportunidades de mejora.

Las técnicas usadas para la evaluación de las etapas del estudio según la metodología propuesta estuvieron basadas en el desarrollo computacional sobre la base de la información obtenida en el período de estudio y la documentación archivada, además de entrevistas formales y no formales con los operadores, personal de mantenimiento, recorrido por las áreas, apuntes y la observación directa del sistema.

2.6. Diseño de propuestas para mejorar la tecnología

Una vez evaluado el sistema, se propusieron según se consideró necesario, las modificaciones para cada una de las áreas evaluadas, con la finalidad de lograr que el sistema de aire comprimido trabaje sin inconvenientes, asegurando menores pérdidas a partir del urgente ahorro de portadores energéticos.

Las propuestas incluyen las modificaciones en la red, de acuerdo a las deficiencias detectadas y que se traducen directamente en gastos innecesarios de energía. Las modificaciones están encaminadas a mejorar el diseño actual, en el cual se circunscriben las referidas a la disminución de pérdidas de carga y perdidas por fugas. Están en función de resolver parte significativa de los problemas relacionados con los portadores energéticos en un relativamente corto período de amortización e incluyen un plan de implementación para el caso de ampliación futura y análisis de sistemas.



Las propuestas están fundamentadas en las herramientas obtenidas de manuales y guías profesionales en tratamiento y evaluación de sistemas modernos de aire comprimido a nivel mundial. Entre estas se encuentran las siguientes:

1. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA, (2009)
2. KAESER, (s.a)
3. COPCO, (s.a)
4. CONAE, (s.a)

Las técnicas aplicadas fueron el análisis de datos y resultados mediante el procesamiento de datos.

2.6.1. Plan de implementación (metodología de análisis de sistemas)

El plan de implementación estuvo apoyado de igual manera en las herramientas antes mencionadas y en las realidades propias del sistema estudiado. Se emplearon técnicas computacionales como el uso del programa Microsoft Office Excel, programa muy práctico y utilizado en ingeniería, además de Microsoft Office Word.

Con el plan de implementación se persigue obtener una metodología de análisis de sistemas de aire comprimido, particularizando las exigencias del sistema de estudio y definiendo las realidades prácticas del mismo.

2.7. Herramientas y equipos empleadas

Instalación de aire comprimido (Escala industrial).

Compresores.

Accesorios.

Redes de distribución.

Hoja de cálculo. Costo del aire comprimido.

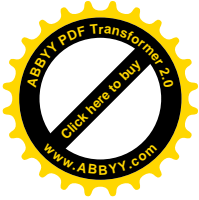
Calculador de reducción de consumo.

Métodos de tratamiento y evaluación de sistemas de aire comprimido.

Memoria de cálculo de sistemas de aire comprimido.

2.8. Valoración económica de las propuestas

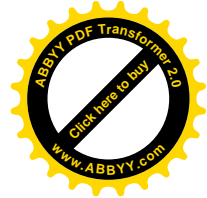
De acuerdo a las modificaciones planteadas se realizó la evaluación técnico - económica de las mismas, determinando el ahorro que representan las propuestas para el sistema.



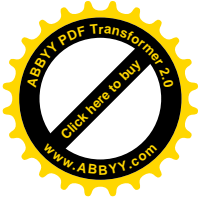
Para su realización, en esta etapa, la planta Termoenergética facilitó los datos necesarios para la evaluación económica como es: la tasa mínima de retorno de la empresa, con respecto al producto final y costos de los kilowatts contratados en los diferentes horarios del día.

2.9. Conclusiones parciales

1. El aire atmosférico puede variar en cuanto a humedad y temperatura en dependencia de la estación del año, por lo que sería recomendable realizar un análisis durante los períodos prolongados de lluvias y evaluar la posibilidad de proteger la toma con el objetivo de que no varíen significativamente.
2. Las herramientas utilizadas forman parte de los métodos modernos de análisis de sistemas de aire comprimido, por lo que los resultados representan datos de gran significado para el sistema.



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Uno de los aspectos más importantes en las investigaciones ingenieriles, lo constituyen el análisis y/o discusión de los resultados. Los mecanismos de validación garantizan que la información obtenida sea coherente y precisa, además de fortalecer la confiabilidad de los mismos. En este capítulo se pretenden exponer los datos del proyecto y las conclusiones finales, por lo que se desarrolla la metodología propuesta en el capítulo anterior y se discuten los resultados obtenidos.

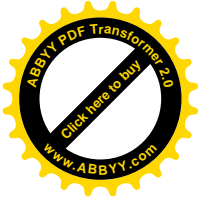
Para llevar a cabo el proyecto, se procedió a realizar un reconocimiento exhaustivo de la instalación, comenzando por los equipos de generación de aire comprimido además del seguimiento de las líneas principales que salen desde los compresores y de las líneas secundarias y de servicio que forman el sistema. A continuación se muestran los resultados alcanzados.

3.1. Descripción del sistema actual

Las unidades compresoras tienen como objetivo fundamental el suministro de aire comprimido a diferentes presiones al proceso tecnológico de la industria metalúrgica, entre estos están; aire para el transporte neumático en la planta de preparación de mineral, hornos de reducción y calcinación y sinter; aire tecnológico para la planta de lixiviación y lavado; aire de servicio para la limpieza, mantenimiento, filtros de manga y talleres, y por último, aire para la instrumentación de la empresa.

Inicialmente, con la puesta en funcionamiento de la industria, se producía aire para las plantas de procesos (preparación de mineral, hornos de reducción, lixiviación y lavado, recuperación de amoníaco y calcinación y sinter), además de la planta de gas, torres de enfriamiento de agua, la central termoeléctrica de la empresa, talleres y el centro de investigaciones de la laterita (CIL).

A estos consumidores se les garantizaban los diferentes tipos de aires según las demandas del equipamiento existente en cada área, además de los procesos que se desarrollaban en ellas. Para esto, se contaba con 14 equipos compresores, cinco para el transporte neumático, tres para la generación de gas (se utilizaba aire caliente), tres más



para garantizar el aire de instrumentos y de servicio y por último otros tres para producir aire tecnológico.

En aquellos inicios, la fábrica tenía una capacidad productiva de 30 mil toneladas de producto final.

En la actualidad, las condiciones son otras, la capacidad productiva de la empresa es diferente y esto ha provocado que se hayan realizado cambios para obtener mayores producciones y elevar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. Se adquirieron tres compresores de baja potencia para disminuir el consumo energético de la planta, se pretendía sustituir estos compresores (Betico) por los K-500 de 2500 MW, utilizados para la planta de gas aunque por necesidades productivas y el aumento del equipamiento neumático fue necesario mantener funcionando dos de estos equipos.

Con las mejoras productivas se decidió la no utilización de la planta de gas y los tres compresores que generaban aire caliente para el funcionamiento de la misma, se incorporaron a la generación de aire para transporte neumático, luego de que en el año 1989, uno de los cinco compresores para este fin, sufrió rotura total por falla eléctrica. Se instalaron enfriadores a la salida de los compresores e inmediatamente se unieron como apoyo para el transporte neumático, hecho que garantizó el suministro de este servicio sin dificultades hasta la fecha.

Hoy en día, luego de roturas, modificaciones y cambios, el sistema cuenta con 16 equipos compresores para garantizar el servicio de aire comprimido de toda la empresa. A continuación se ofrece un análisis de las partes del mismo.

3.1.1. Análisis del sistema de aire comprimido (Suministro y Demanda)

La generación de aire comprimido se realiza en dos casas de compresión, la primera es la sala principal (casa de compresores) y la segunda es la antigua planta de gas (edificio viejo de la planta de gas). El aire se distribuye por medio de un sistema de tuberías de diferentes diámetros con sus respectivas válvulas de control y accesorios. Esta distribución se realiza a través de colectores principales, tuberías secundarias y de servicio que llegan hasta cada consumidor.

La instalación para la producción de aire comprimido tiene 16 compresores y se reparten según el tipo de aire que producen.

3.1.1.1. Casa de compresores

En la casa de compresores (ver anexo 1) se genera la mayor parte del aire comprimido de la empresa, en esta área se encuentran ubicados 10 compresores.

Compresores de aire para tecnología.

Existen tres compresor centrífugos del tipo TK2RVA-99 (ver figura 3.1) de fabricación checa (31, 32 y 33 respectivamente), los cuales producen aire comprimido a presión de 110 kPa ($1,1 \text{ kgf/cm}^2$) y caudal nominal de $40\ 200 \text{ m}^3/\text{h}$ según diseño.

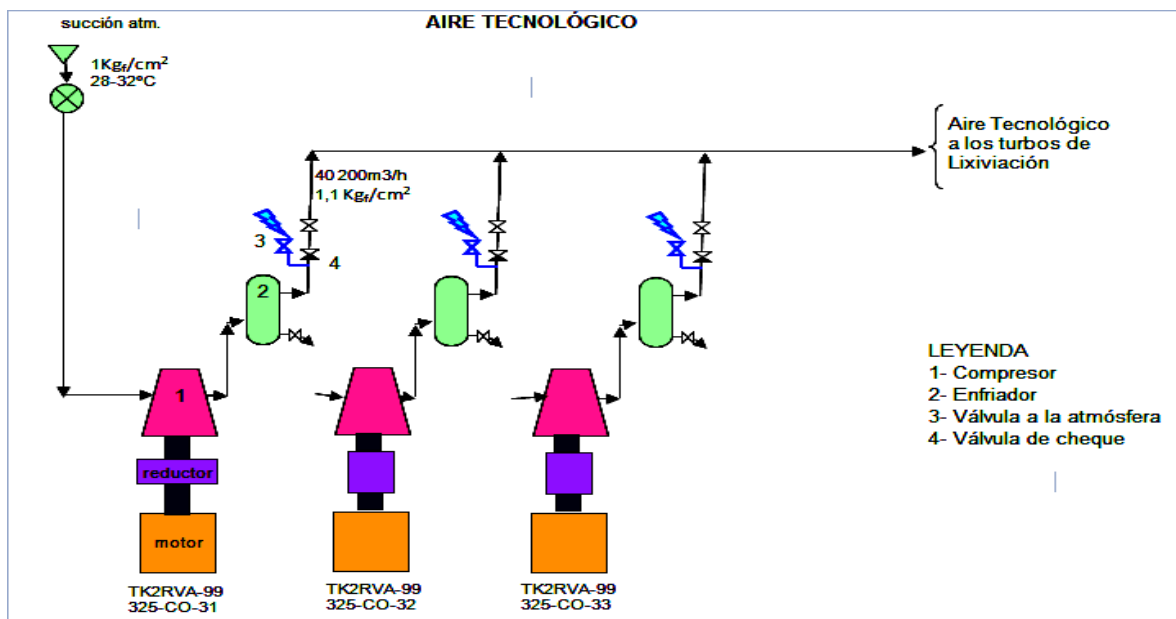


Figura 3.1. Esquema de los compresores para aire tecnológico.

Las características de estos equipos se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de los compresores TK2RVA 99.

Presión de trabajo	$1,1 \text{ kgf/cm}^2$
Caudal	$40\ 200 \text{ m}^3/\text{h}$
Voltaje	10 000 volt
Potencia	1700 kW

Fuente: Equipo compresor.

Compresores de aire para transporte neumático.

Existen en la planta cuatro compresores centrífugos del tipo 5 HK-265/4,2T (21, 23, 24 y 25 respectivamente) con dos etapas de compresión y separador de humedad intermedio. Producen aire comprimido a presión de 320 kPa ($3,2 \text{ kgf/cm}^2$) y caudal nominal de $15\ 900 \text{ m}^3/\text{h}$ cada uno para las diferentes necesidades del transporte neumático. Como se observa en la figura 3.2.

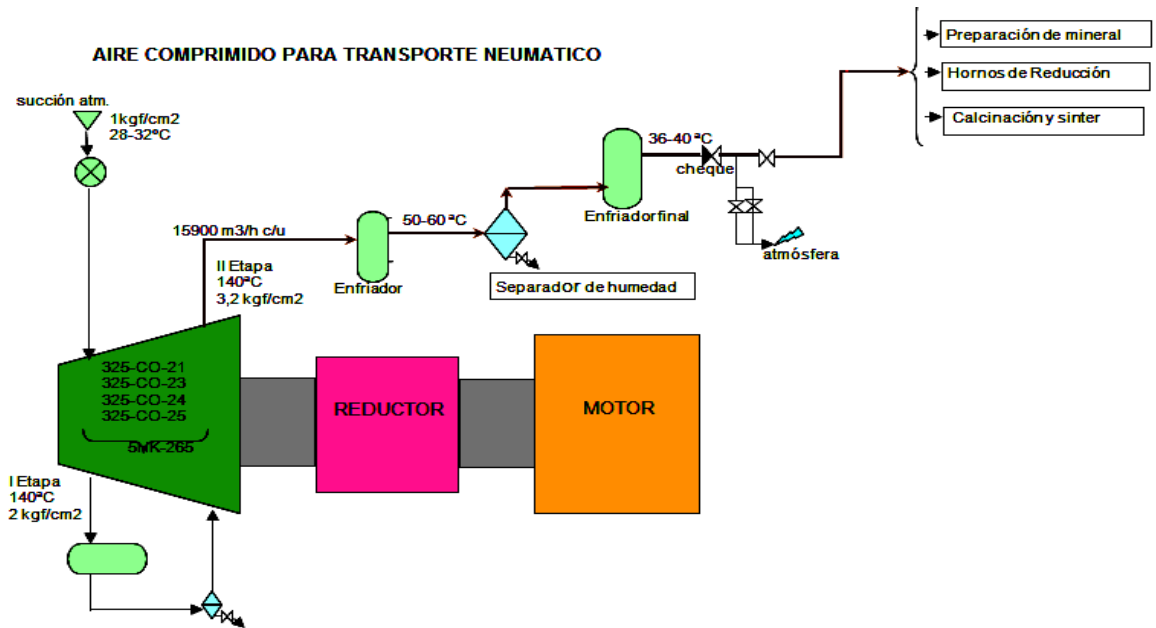


Figura 3.2. Esquema de compresor para aire de transporte neumático.
Las características de estos equipos se encuentran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características de los compresores 5 HK-265/4,2T.

Presión de trabajo	3,2 kg _f /cm ²
Presión nominal	4,2 kg _f /cm ²
Caudal	15 900 m ³ /h
Voltaje	10 000 volt
Potencia	1600 kW

Fuente: Equipo compresor.

Compresores de aire para instrumentación.

De los tres compresores de émbolo (pistón) 2 BM10-50/8 (11, 12 y 13), de fabricación soviética con que cuenta la planta y que poseen dos etapas de compresión con enfriamiento intermedio, se utiliza uno. Estos compresores comprimen aire hasta 800 kPa (8 kg_f/cm²) de presión y tienen un caudal de 3000 m³/h . Ver figura 3.3.

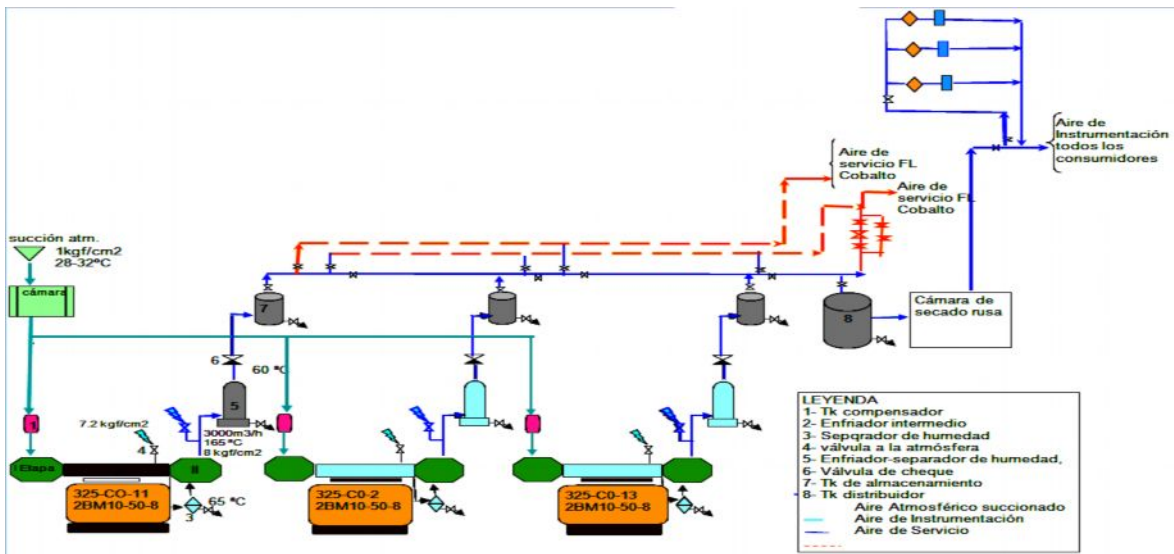


Figura 3.3. Esquema de los compresores para aire de instrumentación.

En la siguiente tabla se resumen las características de los compresores.

Tabla 3.3. Características de los compresores 2 BM10-50/8.

Presión a la salida de la 1 ^{ra} etapa	2,0 kg _f /cm ²
Presión a la salida de la 2 ^{da} etapa	7 kg _f /cm ²
Presión de trabajo	8,0 kg _f /cm ²
Caudal	3000 m ³ /h
Voltaje	6000 volt
Potencia	320 kW
Temperatura del aire a la salida de la 1 ^{ra} etapa	+ 100 ⁰ C
Temperatura del aire a la salida de la 2 ^{da} etapa	165 ⁰ C

Fuente: Equipo compresor.

A este proceso se incorpora un compresor LK-3-JJ Betico de tres existentes (1600 m³/h de caudal) y un compresor Atlas Copco de caudal nominal 1800 m³/h, los que producen aire a presión de 800 kPa (8 kg_f/cm²).

3.1.1.2. Edificio viejo de la planta de gas

Compresores de aire para servicio.

Para garantizar este aire, se cuenta con otro de los compresores 2 BM10-50/8, además del 5 % de un compresor centrífugo del tipo K500-61-1 de dos existentes, que produce aire comprimido a la presión de 800 kPa (8 kg_f/cm²) y caudal nominal de 25 000 m³/h para garantizar las necesidades de la fábrica, el 95 % restante de su capacidad se emplea en otras necesidades de la empresa en determinadas ocasiones según se requiera (apoyo al transporte neumático).

Sobre los compresores

Para el trabajo de los compresores, el aire es succionado de la atmósfera a través de silenciadores previstos en las cámaras de succión para cada compresor, donde se realiza la limpieza del aire mediante un filtro acoplado.

El mando de los compresores es automatizado en grado considerable y los sistemas de regulación automáticos garantizan los parámetros necesarios en la compresión. Los compresores se accionan por medio de un motor eléctrico y un multiplicador. La lubricación se efectúa desde un tanque de aceite previsto de bombeo, filtros y enfriadores.

Como se muestra en la figura 3.4, para garantizar la seguridad máxima de explotación, el mando de los compresores se efectúa desde un panel central donde se ordena el arranque, parada y control de la explotación según el estado operativo del equipo.

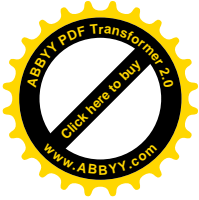


Figura: 3.4 Foto del panel de control de los compresores.

Fuente : Instalación de estudio.

Exceptuando el compresor Atlas Copco (dos años de explotación), dos compresores LK-3-JJ Betico y dos 2 BM10-50/8 (12 y 13), estos por reparación capital reciente, de forma general, como todos los demás tienen un tiempo de explotación de 25 años (puesta en marcha de la empresa) presentan considerables deficiencias técnicas operativas que influyen con frecuencia en los parámetros de calidad del aire suministrado a los consumidores y el incremento del consumo energético.

Cada compresor tiene dos cabinas de mando, una para la parte eléctrica de control y fuerza y otra para la parte de instrumentación. Están constituidas fundamentalmente por un interruptor de fuerza y un arrancador magnético, los cuales sufren deterioro constante en las unidades de contacto y “mata chispas” por su accionamiento frecuente debido al plan de paros en consecuencia con el programa de ahorro de la empresa en el horario pico del consumo energético nacional (compresores para transporte neumático).



La regulación de la capacidad de los compresores es de forma individual y manual, con vista a garantizar una presión estable se realiza mediante la descarga a la atmósfera, lo que provoca alto consumo de energía, empleada para comprimir (energía desperdiciada). El escape de aire a la atmósfera se efectúa a través de un silenciador de escape.

En las salas de máquinas se generan altos niveles de ruidos y vibraciones constantes, propias del funcionamiento de los equipos.

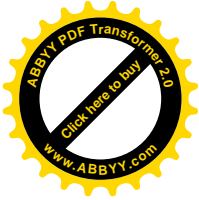
3.1.1.3. Caracterización del aire suministrado a los consumidores

La metalurgia incluye procesos tecnológicos que utilizan aire comprimido y en la empresa se emplean indistintamente diferentes tipos de aires, estos se diferencian entre sí por sus características de calidad, de ahí, que cada consumidor (planta o área) consuma el que necesita. Independientemente de ser utilizado en procesos tecnológicos, equipamiento neumático, instrumentación, servicios e incluso en las actividades más simples de la empresa como puede considerarse el soplado de superficies (limpieza).

Caracterización del aire para instrumentación.

Este es el aire de mayor calidad que se produce, es el único al que se le da tratamiento antes de llegar a su punto de consumo. Se hace pasar por cámaras de secado (cuatro) para eliminar la mayor cantidad de humedad posible, en correspondencia con las exigencias de los equipos que utilizan este aire para su funcionamiento. A continuación se exponen las características del aire de instrumentación.

- Presión a la salida del compresor y entrada a la cámara de secado: $6 - 8 \text{ kg/cm}^2$
- Temperatura: $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Temperatura de rocío: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Caudal de entrada a la cámara de secado: $300 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Temperatura de entrada del aire a la cámara de secado: $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Temperatura de salida del aire de la cámara del secado: $50 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del intercambiador de calor: $30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Consumo de aire seco para regeneración del material filtrante: $200 \text{ a } 250 \text{ m}^3/\text{h}$.



- Presión del aire de salida: 5 - 8 kgf/cm².

Caracterización del aire para transporte neumático.

En las líneas de distribución de este aire es donde más humedad se concentra, ocasionada por los grandes flujos que se manejan y en consecuencia con la no posibilidad económica de instalar sistemas de tratamiento.

- Presión del aire de salida: 3,2 kgf/cm².
- Capacidad de generación: 63 600 m³/h.

Caracterización del aire tecnológico.

Este aire es el que menos cuesta producir por ser el de menor presión.

- Presión del aire a la salida: 1,1 kgf/cm².
- Temperatura del aire de salida: 40 °C (después del enfriamiento).
- Capacidad de generación: 80 400 m³/h.

Caracterización del aire para servicio.

En el caso del aire de servicio, este no requiere especificaciones debido a que su finalidad no es para equipamiento, sino en muchos casos, limpieza de áreas, materiales, accesorios, equipos e incluso limpieza de la ropa de trabajo del personal. Estas actividades se extienden a las más diversas áreas que conforman la empresa, por lo que su consumo no es regulado y el gasto energético para producirlo es elevado.

3.2. Distribución de aire comprimido (consumidores)

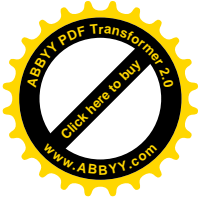
Con vista a conocer el consumo de cada tipo de aire que se produce, se separaron los consumidores según sus demandas:

Consumidores de aire tecnológico

En la etapa tecnológica de lixiviación y lavado se necesita el constante flujo de aire tecnológico para el funcionamiento de los Turboaeradores.

Consumidores de aire de transporte neumático

En algunas de las etapas vitales del proceso se necesita transportar el mineral desde una instalación a otra e incluso de una planta a otra durante el transcurso de la tecnología aplicada en la empresa. Transporte neumático de mineral a la tolva mezcladora, hasta



los silos, a las tolvas de los hornos de reducción, aereación de tolvas y silos y transporte neumático del polvo en los Electrofiltros.

Consumidores de aire de instrumentación

En el caso del aire de instrumentación, este es utilizado en la mayoría de los equipos que se encuentran distribuidos por todas las plantas de producción, auxiliares, talleres, laboratorios, etc., que intervienen o apoyan los procesos metalúrgicos de la empresa.

Consumidores de aire de servicio

Ocurre de forma similar a los consumidores de aire de instrumentación pero con la diferencia que se utiliza además, en oficinas, talleres y comedores.

Cabe mencionar que este tipo de aire es el que más se produce, acto que propicia el mal uso como consecuencia de ser “aire de servicio” y como el nombre lo indica, es generalizado el pensamiento erróneo de que se puede utilizar deliberadamente y en grandes cantidades sin importar las consecuencias propias del sobreconsumo (demanda artificial).

Como se observa en la figura 3.5, el mayor consumo de aire ocurre en tres plantas principales y la menor parte (otros) está repartido entre la planta de calcinación y sínter, talleres, planta de cobalto, la central termoenergética y recuperación de amoníaco en ese orden.

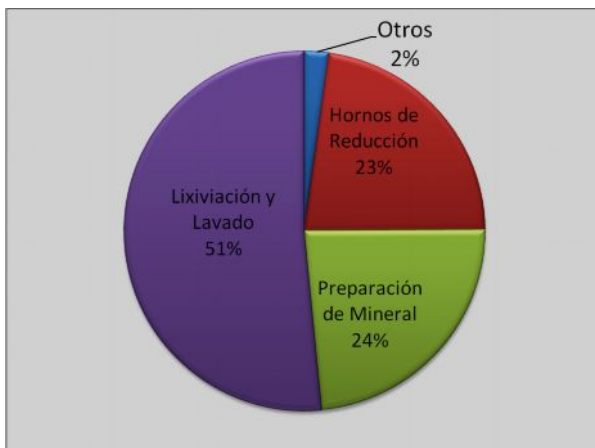


Figura 3.5. Consumo de aire comprimido, por plantas.

El comportamiento del consumo de aire comprimido está en dependencia del estado de cumplimiento de la empresa con los planes de producción. Sin este servicio, simplemente no existiría la tecnología de obtención de sínter de níquel como principal producto final de la fábrica, sustentado en que en las etapas principales de la tecnología se utiliza el aire comprimido para poder desarrollar los procesos tecnológicos con

determinados índices de eficiencia y calidad en correspondencia con las exigencias de los clientes.

En la figura 3.6, se observa el comportamiento del consumo promedio por semana, durante los dos meses en que se realizó el estudio del sistema.

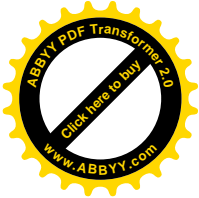


Figura 3.6. Consumo promedio por semana.

Es evidente que durante el estudio del sistema, el comportamiento se mantuvo regulado a inicios y finales de semana, no siendo así los demás días (miércoles y jueves). La tendencia del consumo está terminada por la disminución del mismo a mediados de semana, acto que está dado por la mayor concentración de paros de equipos consumidores durante este período de tiempo y que está en correspondencia con los planes de mantenimiento que ocurren en la gran mayoría de los casos, en esos días (los mantenimientos más frecuentes se realizan a mediados de semana, aprovechando la mayor fuerza de trabajo disponible durante la semana para realizar los mismo; Fuente: Tecnólogo de redes del sistema de aire comprimido).

Ocurriendo que los lunes y martes son los días que menos equipos salen fuera de operación por una causa u otra (averías, roturas, mantenimientos, etc.).

De manera general, el comportamiento del consumo de aire comprimido de la empresa no se puede predecir, como se observa en la figura 3.7. Está en correspondencia con las capacidades productivas por las que atraviesen las plantas en cada momento, por lo que solo cabe mencionar, que hacia finales de mes se incrementa el consumo por la



necesidad de cumplimiento de los planes productivos, metas que se traza la empresa. En estos períodos ocurre que las plantas se ponen en función del cumplimiento de los planes de producción y de ahí la necesidad de un mayor consumo para poder desarrollar los procesos metalúrgicos.

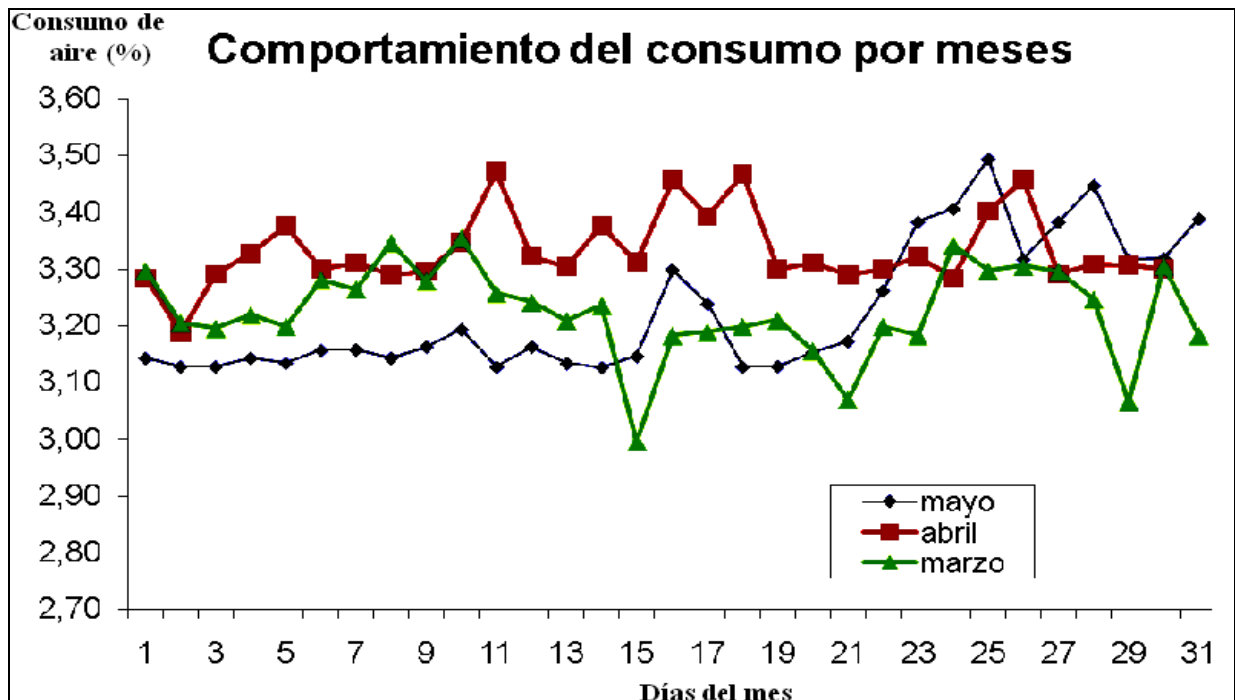
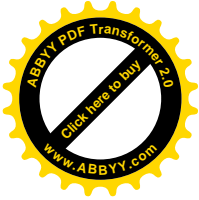


Figura 3.7. Comportamiento del consumo por meses.

3.3. La red actual

El material de las tuberías que forman las redes de distribución de aire comprimido es acero al carbono. En su arquitectura están incluidos codos, ángulos e inclinaciones, ensanchamientos y estrechamiento que permiten su ajuste a la arquitectura de distribución. En el anexo 2, se muestra una tabla comparativa de este material contra materiales modernos donde se observa que en la actualidad existen materiales que superan totalmente el acero al carbón en cuanto a características técnicas que mejoran competitivamente la tecnología del aire comprimido.

En las instalaciones de la empresa, al utilizar este material por diseño, según la tabla comparativa y después de 25 años de explotación continua, las condiciones son más desfavorables por mal estado de las redes. Por las propias condiciones del material de construcción, ligado al hecho de que en la tecnología aplicada en la empresa, se utilizan elementos químicos (ácidos, amoníaco y otros) que agravan las condiciones ambientales de operación, en zonas determinadas, el ambiente agresivo provoca el deterioro frecuente de las tuberías por oxidación, corrosión, desgaste, abrasión, etc.



En las áreas más afectadas por estos elementos químicos, es preciso mencionar que con relativa frecuencia es necesario cambiar tramos de secciones completas, por el mal estado de las redes que trabajan bajo estas condiciones.

3.3.1. Ampliaciones en los últimos tiempos

Con el tiempo, se han presentado situaciones (incremento de producción y necesidades productivas entre otras) que han implicado el incremento de tramos en la red y una vez solucionado los contratiempos (en esos casos), estas tuberías adicionales han quedado en el sistema. Actualmente no se usan y constituyen elementos que atentan contra la eficiencia del sistema por ser áreas de altos riesgos de fugas, acumulación de condensado y caídas de presión como consecuencia de que las dimensiones de las tuberías utilizadas en las ampliaciones no cumplen las condiciones establecidas en la mayor parte de los casos detectados.

Del buen estado de las redes y su correcto dimensionado, depende que el aire comprimido llegue sin dificultades a las áreas de uso, y según la confiabilidad de las mismas, se garantiza que todo el aire producido alcance su punto final de consumo.

El sistema de distribución de aire por tuberías de acero al carbón, está encargado de transportar un flujo de aire de millones de metros cúbicos mensuales para tecnología, transporte neumático, instrumentación y servicio, y en sus condiciones actuales, el sistema de distribución no garantiza que ese flujo de aire circule por las tuberías sin perderse al menos entre el 15 y 20 % del flujo total de aire por fugas y mal dimensionado de las tuberías de ampliación, además del grave estado de oxidación en varias secciones, pérdida de sección interior (reducción del diámetro activo) y acumulación de condensado.

3.4. Diagnóstico de la instalación

El diagnóstico del sistema estuvo encaminado a determinar las deficiencias que existen en el mismo y que influyen negativamente sobre la calidad de la tecnología, además, que ocasionan pérdidas para la empresa en consecuencia con el indeseado aumento de los costos totales de producción, principalmente por mantenimientos, reparaciones, inversiones y pérdida de recursos energéticos. El diagnóstico estuvo dividido de la siguiente manera:

1. Área de compresores
2. Diagnóstico de accesorios

3. Diagnóstico de redes

3.4.1. Situación que presenta el sistema de aire comprimido

Para determinar la situación que presenta el sistema actual, el análisis se subdividió en dos partes. Producción y demanda.

3.4.1.1. Área de compresores (producción)

En la parte de producción de aire comprimido se encuentran los compresores, como las máquinas capaces de comprimir el aire hasta las presiones de trabajo en el sistema. La capacidad de generación, la cantidad de equipos, el estado técnico, las deficiencias operativas el régimen de trabajo entre otros factores, caracterizan las producciones y el desarrollo eficiente de los procesos. En los anexos (ver anexo 3) se encuentra una tabla con el estado operativo y el tipo de aire que produce cada compresor de la instalación.

La medida de paro programado de los equipos por el ahorro energético provoca el deterioro sistemático del equipamiento, debido a que estos equipos de altas frecuencias de trabajo, no están diseñados para soportar paros frecuentes, solo los programados por mantenimientos y estos están en el orden de una o dos veces por año.

En la figura 3.8 se muestran los daños que sufren los compresores en sus partes móviles, a consecuencia de paro y/o puesta en marcha diaria.

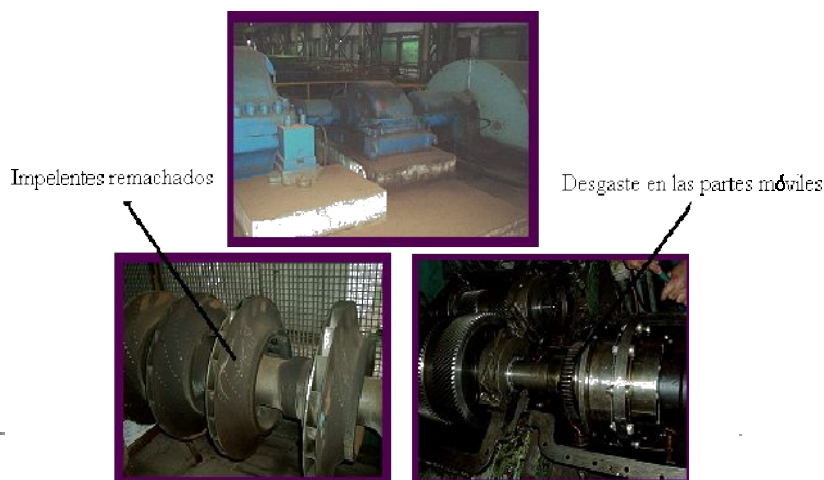
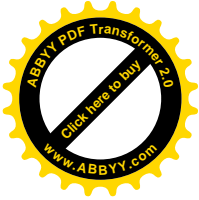


Figura 3.8. Daños ocasionados a los compresores por programa de paro

Fuente: Instalación de estudio

Con estas deficiencias, ha sido necesaria la interconexión de tuberías mediante *by pass* para garantizar el suministro de estos tipos de aire en consecuencia con el pobre poder adquisitivo de equipos compresores y de piezas de repuesto, de manera que estos



compresores se utilizan indistintamente según las necesidades productivas que se presentan en el quehacer cotidiano en la producción metalúrgica de la fábrica.

Los compresores son el corazón de la tecnología (literalmente), de manera que su estado técnico operativo posibilita valorar el estado de salud con que cuenta el sistema en general, aunque por si solos no garantizan el buen funcionamiento del mismo.

3.4.1.2. Diagnóstico de accesorios

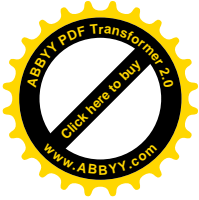
Entiéndase por accesorios todos los dispositivos que se encuentran conectados al sistema y que deben garantizar el adecuado funcionamiento del mismo. Se analizaron en conjunto, independientemente del tipo de aire en que se emplean.

Filtros de succión y separadores: Se observa alto grado de oxidación en el interior de las tuberías de los mismos, aspecto que provoca la incorporación de partículas indeseables al sistema y no garantizan una adecuada separación de partículas extrañas (sólidos en suspensión, partículas metálicas y otros) por lo que las mismas viajan libremente por el sistema hasta los consumidores, provocando perforaciones frecuentes en los materiales filtrantes.

Inter y Pos enfriadores: En algunos casos no garantizan sus funciones como consecuencia de tupiciones por las mismas partículas extrañas que se incorporan al sistema.

Recuperadores de calor: El sistema no cuenta con sistemas recuperadores de calor. Entre un 80 % y un 93 % de la energía eléctrica utilizada por un compresor de aire industrial se convierte en calor. En la mayoría de los casos, con un diseño apropiado de la unidad de recuperación de calor, se puede recuperar desde un 50 % hasta un 90 % de esa energía térmica disponible, la cual puede ser utilizada para el calentamiento de aire o de agua; por ejemplo, se puede usar para precalentar el agua tratada de compensación en calderas. Aún cuando la cantidad de energía térmica recuperable es alta, usualmente no es suficiente como para producir vapor. Exceptuando esto último, son considerables los ahorros en energía derivados del uso del calor recuperado (AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, s.a).

Lubricadores: El sistema de lubricación centralizado desajustado (bombas de pistones o lubricadores), disminuye la eficiencia del bombeo de aceite, la pérdida de regulación del goteo sistemático genera sobreconsumo de lubricantes y en general el sistema carece de piezas de repuesto.



Reguladores de presión: Los dispositivos de regulación como los barómetros no garantizan un control visual del sistema, ya que en consecuencia con las ampliaciones de la empresa, estos equipos no son representativos para la totalidad de secciones del sistema, además del estado en que se encuentran, más de unos pocos (fuera de servicio).

Tanques de almacenamiento: Los recibidores no están presentes en todas las líneas por lo que en ocasiones (pico de consumo en el sistema) el compresor equilibra las demandas de los consumidores a costa del aumento de su consumo energético para garantizar el suministro a los mismos (aire de transporte neumático, tecnológico y de servicio).

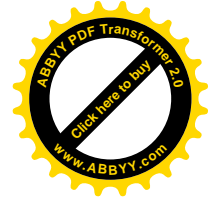
Trampas y drenajes automáticos (sistema de purga): Estos dispositivos no garantizan por si solos la extracción del condensado del interior de las tuberías, además de no ser representativos para todo el sistema en consecuencia con las ampliaciones mencionadas. Es notable que varias están fuera de servicio por el alto grado de oxidación y deterioro que presentan (ambiente agresivo), motivo por lo que el agua circula libremente por el interior de las redes del sistema, hecho que resulta en mayor medida en el caso de las redes de aire para transporte neumático y que provoca caídas de presión frecuentes en el sistema.

En relación con la tecnología, el buen estado de los accesorios garantiza los parámetros de calidad del aire, de ahí, que sea importante mantener un control sistemático sobre estos para garantizar que los equipos consumidores operen sin dificultades que puedan interferir negativamente sobre los procesos productivos de la empresa. Es válido mencionar que el adecuado estado técnico de los accesorios incide significativamente en las tuberías por las cuales se transporta el aire hasta los consumidores y que determinan con su buen funcionamiento la calidad y eficiencia del sistema.

3.4.1.3. Diagnóstico de las redes de distribución

El aire se distribuye a través de tuberías que en su mayoría forman circuitos abiertos y se puede clasificar como una red mixta, producto de que en ocasiones se emplean indistintamente un compresor u otro para apoyar las necesidades que surgen durante la producción, acto que ha ocasionado el incremento de tramos en la red y que propician la acumulación de condensado y caídas de presión.

Dicha red carece de grifos de purga ubicados convenientemente para eliminar el condensado. Al acumularse el condensado en las tuberías, reduce su diámetro activo por



oxidación, provoca el arrastre de agua a los consumidores, eleva las pérdidas de presión del sistema y reduce el tiempo de vida útil de los equipos neumáticos.

En este tipo de instalaciones las tuberías deben disponerse con una pendiente de 6 a 10 milésimas, en la dirección del flujo, de manera que el agua condensada sea arrastrada “aguas abajo” y pueda recogerse en puntos bajos, dispuestos cada 25 a 30 metros. Los conductos no descienden indefinidamente por lo que deben disponerse puntos en que se recupere la altura perdida, siendo estos lugares precisamente donde se aprovecha para recoger el agua condensada (COPCO, s.a).

3.4.1.3.1. Caídas de presión en el sistema

La energía neumática es la más usada después de la energía eléctrica y el gas y por ello es importante que esa energía, en lo posible, sea transmitida a su punto de uso con las menores pérdidas posibles durante su recorrido por el sistema.

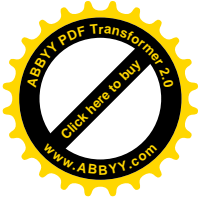
El aire comprimido que es descargado por el compresor, tiene una determinada energía medida a través de su presión, lo ideal sería que esa presión se mantuviera constante a través de todo el sistema hasta llegar a su punto de uso, pero en un sistema real, esa presión comienza a disminuir por la fricción del aire con las paredes internas de la tubería por donde se traslada hasta el punto de uso y por el esfuerzo de ese aire comprimido en pasar por los componentes que le ayudarán a ser un aire de mejor calidad.

En el sistema estudiado se definieron las diversas variantes que por la literatura se presentan como causas más frecuentes de este fenómeno técnico. Entre estos destacan las fugas, saturación de filtros, presencia de condensado en las tuberías, incapacidad productiva de la fuente, incorrecto dimensionado de la red y mal uso del aire comprimido.

A continuación se muestra una tabla representativa de los principales factores que ocasionan caídas de presión en el sistema de estudio.

Tabla 3.4. Factores que provocan caídas de presión en el sistema.

Factores puntuales	Factores secundarios
<ul style="list-style-type: none"> • Acumulación de condensado • Mal dimensionado de las tuberías de ampliación • Longitud del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de simultaneidad • Fugas • Mal uso



Como se observa en la tabla, existen dos factores que provocan caída de presión. Los factores puntuales responden a los elementos que la provocan directamente y que en estos momentos, afectan el sistema, los factores secundarios están referidos a los elementos que en la dependencia de su aumento provocan la caída de presión en mayor o menor medida y que están relacionados entre sí.

3.4.1.3.2. Fugas de aire comprimido

Las pérdidas más comunes de energía en un sistema de aire comprimido acurren a consecuencia de las fugas, lastimosamente el aire no tiene olor y no es visible, por lo que se hace difícil la tarea de localizar los escapes (especialmente cuando son pequeños), pero el aire, aunque no tiene costo alguno, una vez comprimido, se vuelve caro. En los sistemas de aire comprimido se toleran pérdidas de entre un 5 y 15 % del caudal del compresor.

Estas pérdidas deberán ser solo por fugas en los equipos y/o herramientas que usan aire comprimido y no en el sistema, el porcentaje a considerar dependerá de la dimensión de la instalación.

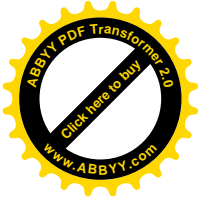
En los sistemas con un promedio de vida de, más de 15 años, las pérdidas por fugas tienden a aumentar y pueden llegar a representar hasta el 30 % de la capacidad de generación de los equipos compresores, razón por la que la implementación de planes preventivos de corrección de fugas siempre es necesario, además de planes de mantenimientos sistemáticos que permitan mantener el sistema operando de manera eficiente.

3.4.2. Diagnóstico general

Se detectaron las principales deficiencias técnicas operativas del sistema, incluyendo las redes en las cuatro variantes de aire que se produce. Para el caso de la sala de compresores se definió su estado técnico de explotación, averías y roturas frecuentes. Los aspectos más significativos lo constituyen los derrames de aceites y otros lubricantes, nivel de la automatización de los compresores, ruidos, estabilidad operativa y régimen de trabajo de los equipos a la vez que se concentraron los estudios en los parámetros reales del estado particular del sistema.

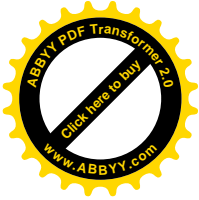
Evaluación de la tecnología de aire comprimido

- El consumo energético de la planta es muy elevado y no se puede predecir su comportamiento, acto que atenta contra la rentabilidad de la empresa.



- La planta no cuenta con disponibilidad de recursos para garantizar el flujo oportuno de piezas de repuesto, inversión y adquisición de nuevo equipamiento, útiles para mantener operando el sistema en consecuencia con las necesidades tecnológicas de la empresa ante cualquier situación, dígase, averías, roturas, mantenimientos, ampliaciones y otros.
- El sistema está sometido a un programa de paro diario por ahorro de energía, lo que provoca el deterioro del equipamiento para comprimir (principalmente en la parte eléctrica de los equipos).
- El sistema no cuenta con medidores de flujo.
- El sistema de extracción de condensado es deficiente, hecho que propicia que el agua llegue hasta los consumidores y provoque mal funcionamiento, roturas e incluso, bajo determinadas condiciones, posibles accidentes laborales.
- Las redes de aire de servicio, transporte neumático y aire tecnológico no tienen tanques de almacenamiento para regular la demanda en los picos de consumo.
- El sistema presenta fugas de aire que superan el 10 % de la capacidad total de generación, lo que provoca altos costos energéticos por pérdidas de portadores de energía (cadena aire comprimido – energía eléctrica – petróleo equivalente).
- No existe un plan de mantenimiento práctico para redes, por lo que se acumulan deficiencias y aumentan los costos de operación. En muchos casos, solo se pueden solucionar en situaciones de paro general de la empresa, aspecto que resulta indeseable y solo ocurre bajo “situaciones excepcionales” (ciclones y otras).
- La señalización de las redes es deficiente en grado considerable (pintura), lo que no permite una fácil inspección del sistema y dificulta las operaciones de mantenimiento detección de fugas.
- La arquitectura y extensión territorial de la empresa hace compleja la tarea de realizar mantenimientos y dificulta el acceso a las redes.

Al analizar el conjunto de elementos que forman el sistema, atendiendo al estado técnico operativo de los compresores, el excesivo contenido de agua dentro de las redes,



% de fugas, recientes caídas de presión reportadas, la no existencia de control de la producción de aire comprimido así como del consumo y la calidad del aire entregado a los consumidores, además de evaluar la frecuencia de averías y fallas durante el tiempo de estudio, de forma general, el sistema es evaluado como deficiente y fuente potencial de ahorro de energía y disminución de costos.

3.5. Propuestas de mejoras para el sistema

Se proponen 6 medidas que garantizarán mejorar la tecnología de aire comprimido en dos aspectos fundamentales (funcionamiento del sistema y reducción de costos por ahorro de portadores energéticos) como se muestra a continuación.

3.5.1. Propuestas para mejorar el funcionamiento de la tecnología

1. Eliminar los tres platillos orificios conectados en líneas, localizados en la entrada de planta de hornos, estacada central y entrada planta de calcinación y sínter. Todos en líneas de aire de servicio.
2. Instalación de controladores de flujo, 36 en total. Ver anexos 4, 5, 6 y 7.
3. Realizar conexión de tuberías de aire para transporte neumático, de la red sellada de hornos (300 mm) a red entrada a silos (300 mm). Ver anexo 8a.
4. Eliminar conexión de aire de servicio con aire para instrumentos en línea de entrada a la casa de bombas (sellar tubería, 100 mm). Ver anexo 8b.
5. Aumentar sistemas de extracción de condensados (válvulas automáticas, principalmente en redes de aire para transporte neumático).

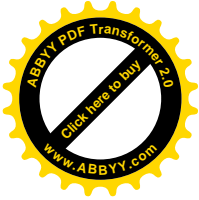
3.5.1.1. Propuestas para reducción de costos

1. Programa de reducción y corrección de fugas.

3.5.2. Justificación de las propuestas

Propuesta # 1:

Al eliminar los platillos, se minimizan las caídas de presión en estas áreas, la acumulación de condensado, se reducen las pérdidas por rozamiento, estrechamiento y ensanchamiento, además de posibilitar que el caudal de aire llegue íntegramente a los consumidores. De esta manera se regula la presión, el caudal y se garantiza el adecuado funcionamiento del compresor al eliminar resistencias que vencer.



Propuesta # 2:

El ahorro energético se obtiene al controlar la presión en la red de distribución de aire, a una presión más estable y menor. Actualmente el método de control de la demanda se obtiene al producir una presión más elevada que almacena mayor cantidad de aire en la línea, la desventaja es que al tener mayor presión se utiliza más aire en la planta, sobre todo aquellos usuarios que no cuentan con reguladores de flujo. A este mayor consumo de aire se le llama demanda artificial, esta demanda puede estar entre 5 a 10 % de la demanda real o efectiva, por tanto, al contar con un controlador de flujo y presión de aire se eliminara esta demanda artificial.

Propuesta # 3:

Con esta conexión se reintegra al sistema la línea a hornos (sellada en estos momentos) además de disminuir la presión de trabajo del compresor 5 HK-265/4,2T (25), lo que garantiza disminuir el consumo energético del compresor para comprimir y se garantiza un flujo regular en las áreas de trabajo (planta de hornos, silos y preparación de mineral).

Propuesta # 4:

Al aislar estas tuberías, no se mezclan los aires y se garantiza conservar cada uno en su lugar lo que provoca la disminución del consumo energético para comprimir el aire perdido y que influye directamente en las caídas de presión y disminución del flujo de trabajo de los consumidores, luego de la conexión.

Propuesta # 5:

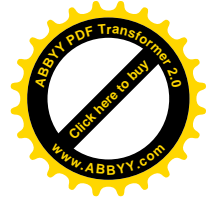
Aumentando los sistemas de purga se garantizará extraer mayor parte del agua que circula libremente dentro de las redes de distribución, además de mejorar el funcionamiento del equipamiento neumático, ya que por cada metro cúbico de aire que se comprime, la séptima parte se convierte en condensado.

Propuesta # 6:

Con un programa de corrección de fugas, el sistema se ahorra instantáneamente el costo por fugas existente en el sistema.

3.5.3. Estudio económico de las propuestas

Para determina el costo de las propuestas, es necesario conocer los costos actuales de producción. En las tecnologías de aire comprimido los costos están directamente relacionados con el consumo de la energía eléctrica consumida para comprimir el aire.



3.5.3.1. Costo de energía

Dentro de los costos de energía se encuentran principalmente el precio de la electricidad necesaria para comprimir el aire y lo que representa las pérdidas por fugas.

Costo debido al funcionamiento de los compresores

El costo de la generación de aire comprimido se basa en el gasto de la energía utilizada por los equipos para comprimir el fluido. Para esto se puede tomar en cuenta la potencia del compresor (de manera individual) y el caudal. Teniendo estos datos, se establece una relación entre ellos que permite calcular lo que cuesta la generación de aire comprimido.

En primer lugar, la potencia se divide entre el caudal y se obtiene el consumo específico de energía (kWh/m³), como se observa en la tabla 3.5.

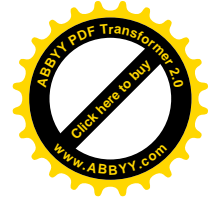
Tabla 3.5. Consumo específico de energía.

Compresor	Caudal (m ³ /h)	kWh/m ³
2BM10-50/8 (11)	3000	0,11
5HK-256/4,2T (21)	15 900	0,10
5HK-256/4,2T (23)	15 900	0,10
5HK-256/4,2T (24)	15 900	0,10
5HK-256/4,2T (25)	15 900	0,10
2TKRVA99 (31)	40 200	0,04
2TKRVA99 (32)	40 200	0,04
LK-3-JJ Betico (41)	1600	0,09
LK-3-JJ Betico (44)	1600	0,09
K-500 (102)	25 000	0,10

Entonces, para saber el costo de producción, se multiplican estos valores por el costo del kWh constatado por la fábrica, que para la empresa, la media evaluada por las tarifas en los tres horarios del día, es de \$ 0,054 CUC. Así se obtienen los siguientes valores, ver tabla 3.6.

Tabla 3.6. Precio de producción de aire, 1 m³.

Compresor	Costo por caudal (\$/m ³)
2BM10-50/8 (11)	0,058
5HK-256/4,2T	0,054
5HK-256/4,2T	0,054



5HK-256/4,2T	0,054
5HK-256/4,2T	0,054
2TKRVA99 (31)	0,023
2TKRVA99 (32)	0,023
LK-3-JJ Betico (41)	0,051
LK-3-JJ Betico (44)	0,051
K-500 (102)	0,054

De esta manera se puede calcular el caudal de aire comprimido que los compresores proporcionan en un día de trabajo, obteniendo los siguientes resultados, como se aprecia en la tabla 3.7.

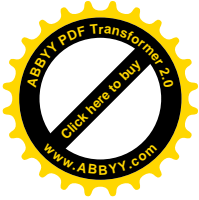
Tabla 3.7. Costo de generación de aire en un día de producción.

Compresor	Caudal (m ³ /h	Caudal (m ³ /día)	Costo de generación (\$/ día)
2BM10-50/8 (11)	3 000	72 000	417,72
5HK-256/4,2T	15 900	381 600	2073,6
5HK-256/4,2T	15 900	381 600	2073,6
5HK-256/4,2T	15 900	381 600	2073,6
5HK-256/4,2T	15 900	381 600	2073,6
2TKRVA99 (31)	40 200	964 800	2203,2
2TKRVA99 (32)	40 200	964 800	2203,2
LK-3-JJ Betico (41)	1 600	38 400	194,4
LK-3-JJ Betico (44)	1 600	38 400	194,4
K-500 (102)	25 000	600 000	3240
Total	175 200	4 204 800	16 744,32

Costos debido a fugas

Si se conoce el caudal (V_C) del compresor y el porcentaje de fugas, se puede obtener el flujo de éstas (V_L) con la siguiente relación: $V_L = (V_C \cdot \% \text{ Fugas})/100$, las unidades dependerán de las unidades en que se exprese el caudal, por ejemplo, m³/min , ft³/min (CONAE, s.a).

Para el cálculo, se suman los caudales de los compresores involucrados que tributan aire a las líneas afectadas por fugas. El porcentaje de fugas (% Fugas), se asume según la experiencia histórica en evaluación de sistemas de aire comprimido e instalaciones con



más de 10 años de explotación. Para el sistema se asume entre un 5 y 40 % , teniendo en cuenta la cantidad de deficiencias que posee el sistema.

Entonces:

$$V_L = \frac{(V_{C(\text{compresor Betico})} + V_{C(\text{compresores 5HK})}) \cdot \% \text{ Fugas.}}{100 \%} \quad \text{Análisis de unidades}$$

$$V_L = \frac{(1600 + 63\,600) \cdot 15}{100} \quad V_L = \frac{(m^3/h + m^3/h) \cdot \%}{\%} = \frac{m^3}{h}$$

$$V_L = 9\,780 \text{ m}^3/h$$

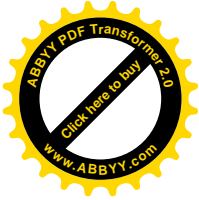
El costo para comprimir el flujo de aire que se pierde por las siete fugas detectadas, se obtiene multiplicando el costo por caudal de los compresores por el flujo perdido por fugas, el resultado es: 262, 09 \$/h , significa una pérdida de 6290, 11 \$/día y 188 703,25 \$/mes . Este valor representa un consumo mensual de 1902, 56 toneladas de combustible convencional (TCC). Este resultado se obtiene al multiplicar la energía consumida (perdida) por el factor de conversión a combustible equivalente (0,392), este varía según el precio del petróleo en el mercado internacional.

Con el programa de reducción de fugas, la empresa ahorra directamente 1902, 56 toneladas de petróleo al mes (considerando 30 días), necesarias para generar los 4853, 48 kW consumidos en la compresión de aire, los 9780 m³/h que se pierden a través de fugas. Razón más que suficiente para poner en marcha el programa de corrección de fugas, además de establecer programas preventivos para el futuro inmediato que permita continuar disminuyendo el consumo de portadores energéticos.

3.6. Plan de implementación (metodología de análisis)

Los procesos metalúrgicos de obtención de níquel se ven valorados económicamente por los costos de producirlo y de mercado, además de la competencia natural de los productos y subproductos que se obtienen de los procesos tecnológicos. El ahorro de energía o los recursos que se utilizan en los procesos de obtención de productos comerciables, puede determinar la rentabilidad de las empresas y el desarrollo de países, regiones y sociedades en general.

Siendo el aire comprimido uno de esos recursos que en grandes cantidades se utiliza en estos procesos, su uso adecuado y el funcionamiento eficiente de los sistemas, puede ser determinante, principalmente cuando sus costos son los más grandes dentro de las producciones industriales.



Para poder operar un sistema de aire comprimido, garantizando al máximo la energía empleada para la compresión del aire, es necesario conocer los parámetros que afectan la tecnología en cada aspecto de análisis de los mismos. Por tal motivo, el conocimiento de estos parámetros unido al poder de influir arbitrariamente sobre ellos, se convierte en una herramienta útil e imprescindible para garantizar una elevada eficiencia y rentabilidad de los sistemas.

A continuación se presenta una compilación de información sobre los elementos, que según el juicio de este autor, constituyen los parámetros fundamentales a tener en cuenta en los análisis y valoración de sistemas de aire comprimido, por su sustancial incidencia sobre los costos de la tecnología y que a su vez determinan el grado de rentabilidad de las empresas.

Fugas en sistemas de aire comprimido:

Las fugas de aire comprimido echan por tierra los recursos financieros de los sistemas. Minimizarlas al máximo (CONAE, s.a).

- Las fugas más frecuentes se manifiestan en interconexiones, acoples, tuberías y dispositivos en mal estado (válvulas de seguridad, depósitos, válvulas en general, conexiones rápidas, herramientas neumáticas, juntas de tuberías, mangueras y menos frecuente en los propios equipos neumáticos)
- Entre los factores que se deben tomar en cuenta para localizar pérdidas de presión, pueden ser; tuberías o ramales de tuberías que no se utilizan. Si no se utilizarán, desconectar los circuitos. Las tuberías y ramales no utilizados y que no están aislados se presurizan y vacían cada vez que presuriza y/o despresuriza el sistema de aire. Estas tuberías y ramales pueden ser una fuente potencial de fugas.

Caída de presión:

Cualquier tipo de obstrucción, restricción o rugosidad, hará que la resistencia al flujo de aire aumente y provoque la caída de presión.

- Reducir la distancia efectiva del flujo de aire para viajar a través del sistema (distancia compresor – consumidor).
- Reducir la fricción y las restricciones, seleccionando correctamente el diámetro de las tuberías. Cuanto más grande sea el tubo, el aire más se llevará en el centro

y no causa la pérdida por fricción con las paredes interiores (incluye resistencia en accesorios y dispositivos instalados en el sistema), además de emplear materiales con los menores índices de rugosidad posible.

- Control de la velocidad del flujo de aire a través del sistema.
- Que el sistema trabaje eficientemente con la menor presión posible y evitar usos inapropiados.

Agua condensada:

La variación de la temperatura entre el aire exterior y el aire del interior de las redes crea una caída en la temperatura dentro de la red y provoca la condensación del vapor de agua que contiene el aire. El condensado se acumula dentro de las tuberías y circula libremente a través del sistema. Representación de la circulación libre del agua en la figura 3.9.



Figura 3.9. Libre circulación del condensado (COPCO, s.a).

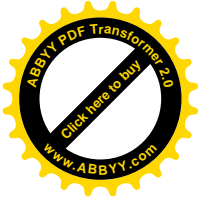
El condensado afecta negativamente a las aplicaciones neumáticas, por tanto, debemos garantizar que no alcance la estación de trabajo si queremos evitar averías. El método tradicional es instalar una curva como se ve en la figura 3.10.



Figura 3.10. Instalación tradicional de conexión de tomas de aire.

Fuente: (CONAE, s.a).

El agua condensada permanece así en los colectores principales y la estación de trabajo no se ve afectada por la humedad. Además, dichas bajantes con cuello de cisne aumentan la seguridad y la protección de los equipos y las herramientas neumáticas en caso de que el secador se averíe o funcione mal.



Dato: por ejemplo, un compresor que genere $500 \text{ m}^3/\text{h}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ puede producir 11 litros de agua por hora (NORTEN, s.a).

Usos apropiados del aire comprimido

El aire comprimido es probablemente el portador energético de más costo en una planta, sin embargo, por ser limpio, por estar siempre disponible y tener muchas facilidades para su empleo, se utiliza en muchos casos para aplicaciones en las que otros portadores energéticos pueden resultar más económicos.

Como regla general el aire comprimido debe utilizarse solo si se incrementa la seguridad de operación, si se logra un aumento significativo de la productividad, o una reducción de la mano de obra, ya que la eficiencia energética global típica de un sistema de aire comprimido es solo de un 10 % . En los casos en que se utilice el aire comprimido para una aplicación dada, la cantidad de aire debe ser la mínima requerida, a la presión más baja posible y durante el menor tiempo (COLCIENCIA, s.a).

Ejemplos de aplicaciones en las que pueden resultar más económicos otros portadores:

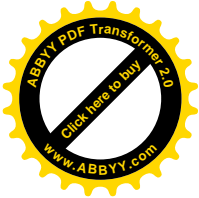
- Usar sopladores o ventiladores en lugar de aire comprimido para soplar, enfriar, agitar, mezclar o inflar empaques.
- Utilizar cepillos, aspiradoras, sopladores en vez de aire comprimido para limpiar partes o remover residuos.
- Emplear aire a baja presión para lanzas de aire o agitación, en lugar de aire comprimido a alta presión.

Capacidad de inversión:

La planta o empresa debe estar en condiciones financieras de adquirir el equipamiento necesario en caso necesario (al instante) y luego de cada evaluación integral del sistema (el período de evaluación se establece de acuerdo al estado del sistema en cada mantenimiento, el cual deberá quedar plasmado en un libro histórico).

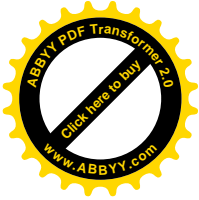
Sistemas de recuperación de calor:

En instalaciones grandes o de producción continua, una manera muy eficiente de aprovechar la energía al máximo posible, consiste en instalar sistemas de recuperación del calor de compresión. Empleando sistemas recuperadores, se puede utilizar la energía térmica en otros fines, como por ejemplo, precalentamiento de mineral, de combustibles, materias primas en los talleres de fundición y otros.



3.7. Conclusiones parciales

Los sistemas de aire comprimido en empresas de producción ininterrumpida, están expuestos a fuertes regímenes de trabajo, lo que provoca que en ocasiones no se puedan solucionar determinadas deficiencias técnicas como consecuencia de no poder detener la producción de la empresa. Por tal motivo, en dependencia de la gravedad en que se presenten las deficiencias como fugas por ejemplo, estas pueden reportar pérdidas significativas que pueden estar en el orden de los miles de pesos y que se pierde sin poder tomar medidas para disminuir la ineficiencia del sistema en esas circunstancias.



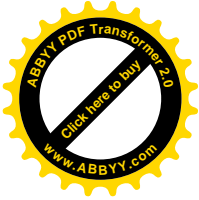
CONCLUSIONES

El sistema de aire comprimido de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, presenta dificultades que disminuyen la calidad y eficiencia de los procesos de generación de aire. Acto que influye de manera singular en el aumento de los costos productivos de la industria. Por tales razones y con el propósito de disminuir el consumo de portadores energéticos y elevar la eficiencia metalúrgica de la empresa, se propusieron modificaciones que garantizarán incrementar la calidad de la tecnología de aire comprimido.

Las propuestas planteadas reportan un ahorro de 262, 09 \$/h , lo que representa \$ 188 703, 25 al mes y equivale a 1902, 56 toneladas de petróleo equivalente para generar la energía mal usada al comprimir un flujo de aire de 9780 m³/h que se pierden a través de fugas durante un mes.

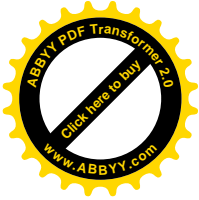
Los procesos metalúrgicos de la empresa dependen del correcto funcionamiento de la tecnología de aire comprimido, de ahí que las deficiencias del sistema, como la calidad del aire suministrado a los consumidores que se ve afectada por el alto contenido de humedad, influye en el deterioro de los equipos e incrementa los costos de producción de la empresa.

Se propuso una metodología de análisis de sistemas de aire comprimido, capaz de aumentar el conocimiento sobre las deficiencias más comunes en la tecnología y dotarnos de herramientas útiles a la hora de operar y controlar sistemas.

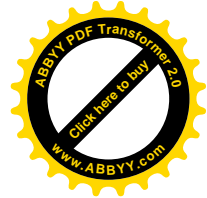


BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO MORALES, J. A. (2009). *Evaluación del sistema de aire comprimido de una cervecería con base a sus futuros aumentos de producción.*, Universidad de Oriente., Venezuela.
- CARNICER, E. (1977). *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.* Barcelona.
- COLCIENCIA. Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido. *Universidad autónoma de occidente*
- CONAE. Guía técnica para sistemas de aire comprimido para la pequeña y mediana empresa [Electronic Version],
- COPCO, A. Guía de bolsillo para la distribución de aire comprimido. 43.
- CORONA, H., Y OTROS. (2008). *Ahorro de energía en el uso adecuado de aire comprimido: FESTO.* Document Number)
- EDWAR, R. L. (1998). Eficiencia del compresor: la diferencia está en la definición. Los Álamos Scientific Laboratory.
- EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD, C. T. Eficiencia energética en sistemas de producción de aire comprimido. *Dirección general del trabajo.*
- GALANO M, R. (2004). *Evaluación de la instalación de aire comprimido de la empresa mecánica del níquel "Gustavo Machín Hoed de Beche" y propuesta de variantes para nueva inversión.*, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- GONZÁLEZ, J. F., & OTROS. (1997). *Cálculo de una red de tuberías para la distribución de aire comprimido.* Universidad de Extremadura.
- KAESER. *Sistema de tubería para la distribución de aire comprimido* o. Document Number)
- KAESER. Tecnología de análisis Kaeser.

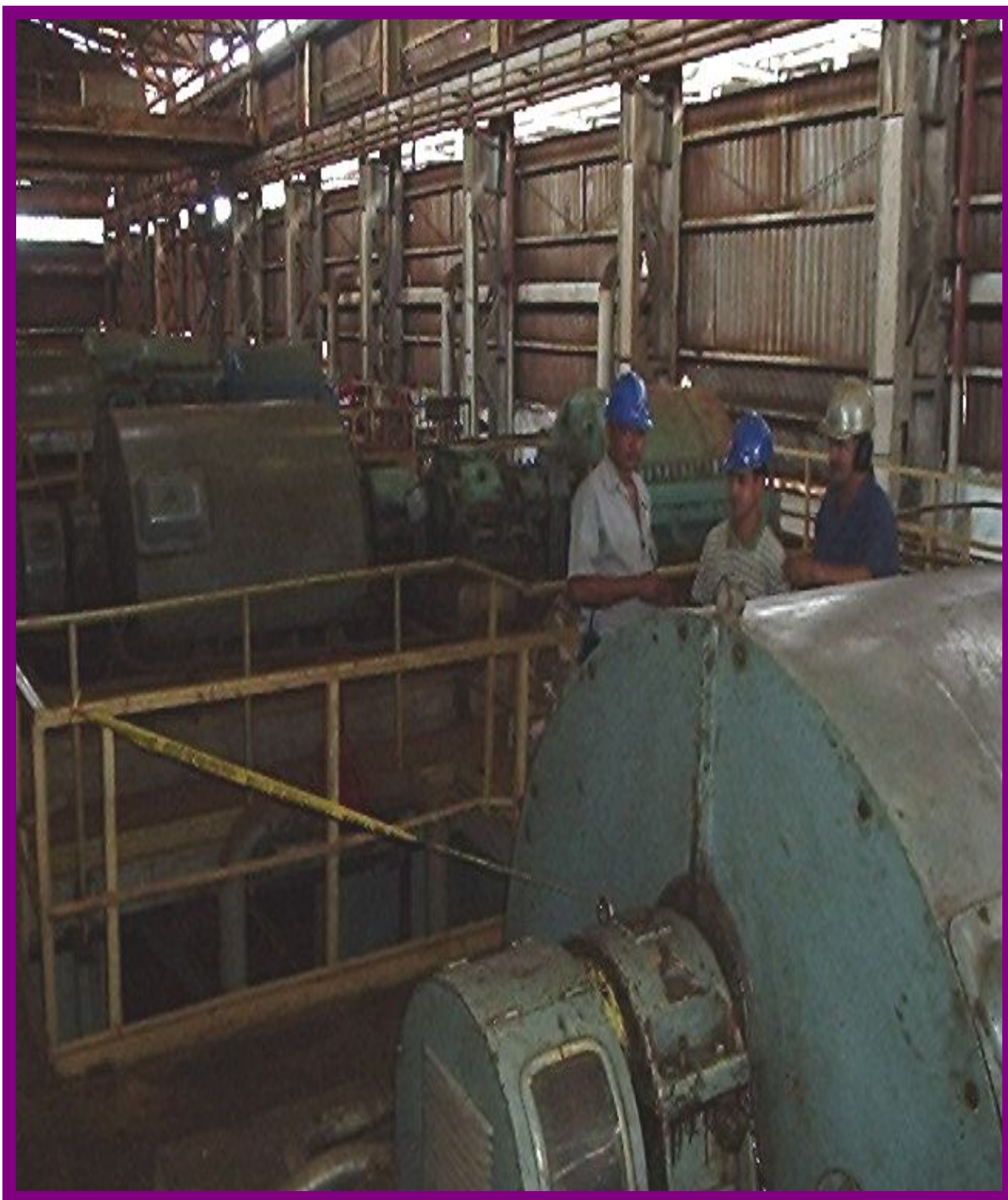


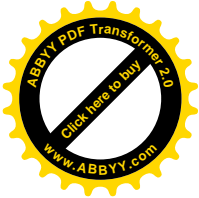
- KERN, R. (1988). Compresores, selección, uso y mantenimiento. *Chemical Engineering Magazine*.
- NORGREN, G. *Aire comprimido* o. Document Number)
- NORGREN, G. La guía Norten para el tratamiento de aire comprimido.
- PETER, & BURKE. (1975). Predicción de funcionamiento en condiciones que no son las de diseño. . *Sundstrand Fluid Handling*.
- PRODUCCIÓN MAS LIMPIA, C. M. (2009). Curso de Eficiencia Energética. México DF.
- RICHAR NEERKEN, F. (1986). *Claves para la selección de Compresores*. (The Ralph M. Parsons. Co. ed.).
- SISSON, B. (2000). Una forma fácil de tomar las temperaturas de compresión. *Chemical Engieneering Magazine*.
- SOLUTIONS, E. S. Guía de selección para productos de ahorro energético, *Ahorro energético*. España.
- WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Consultada el día 5 de mayo de 2011, 9 : 20 am).
- WINTERS, R. G. (1995). Lubricación de Compresores de aire. Compresores, selección, uso y mantenimiento. *Chemical Engieneering Magazine*.



ANEXOS

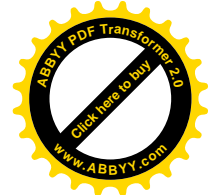
Anexo 1. Casa de compresores.





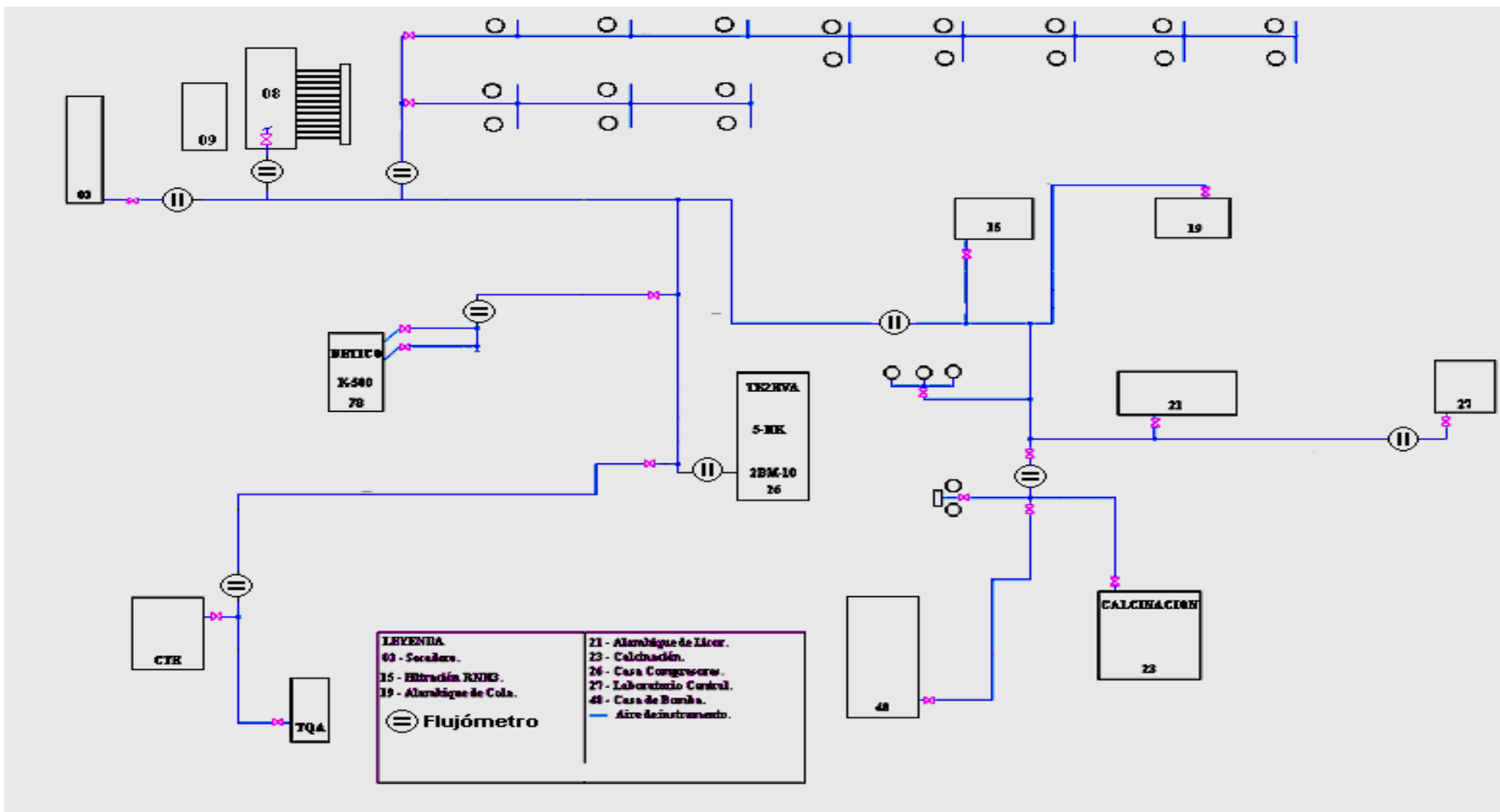
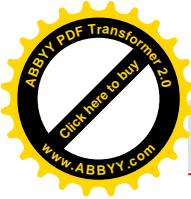
Anexo 2. Tabla comparativa.

Material	Ventajas	Desventajas
<u>Acero al carbón</u>	<u>Material de costo moderado</u> <u>Disponible en varios tamaños</u> <u>Fácil montaje</u>	<u>Formación de óxido, degradación de hasta 40 % del coeficiente de rugosidad interna, presenta límites de contracción, alto grado de corrosión y oxidación.</u>
Hierro negro	Disponible en varios tamaños	Se oxida y presenta fugas, aspereza interior ocasiona sedimentación.
Hierro galvanizado	Material de costo moderado. Disponible en varios tamaños. En ocasiones anticorrosivo.	Instalación dispendiosa, presenta fugas por oxidación de uniones, aspereza interior ocasiona sedimentación y caída de presión, solo la superficie externa suele estar protegida
Cobre	No se oxida, buena calidad de aire. Uniformidad de la superficie interior reduce la caída de presión.	Debe soldarse muy bien para evitar fugas, susceptible a ciclos térmicos, su instalación exige uso de soplete
Aluminio	No se oxida, buena calidad de aire Uniformidad de la superficie interior reduce la caída de presión Coeficiente de resistencia relativamente bajo	Instalación dispendiosa
Aluminio Transair	Instalación instantánea Total ausencia de corrosión Coeficiente de rugosidad constante Resistencia a choques mecánicos Resistente al fuego (auto extingüibles) Tubos flexibles y 100 % reciclables	Precios elevados, asesoramiento técnico de alto nivel en instrucción de operación y montaje

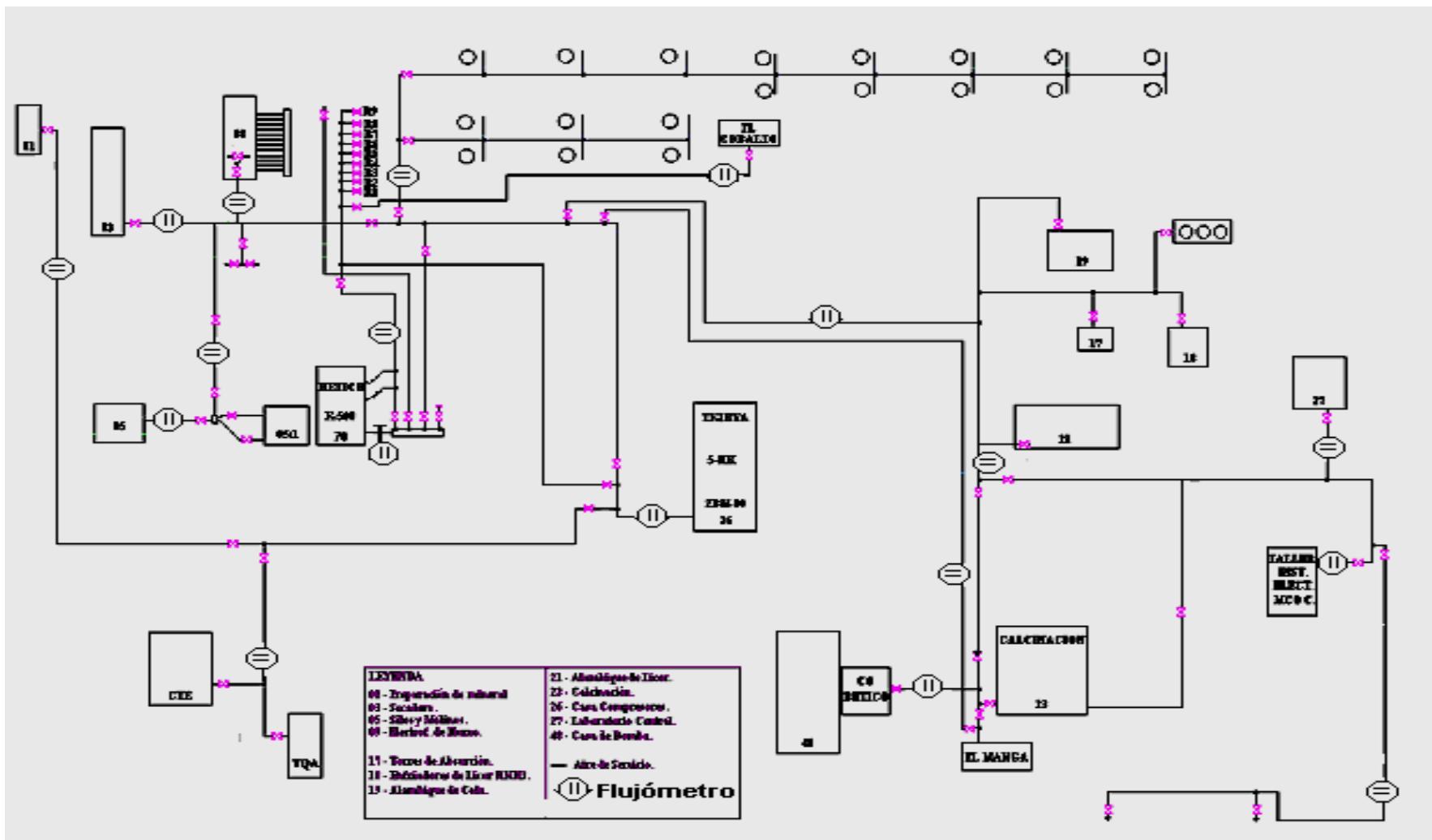


Anexo 3. Tabla estado técnico de los compresores.

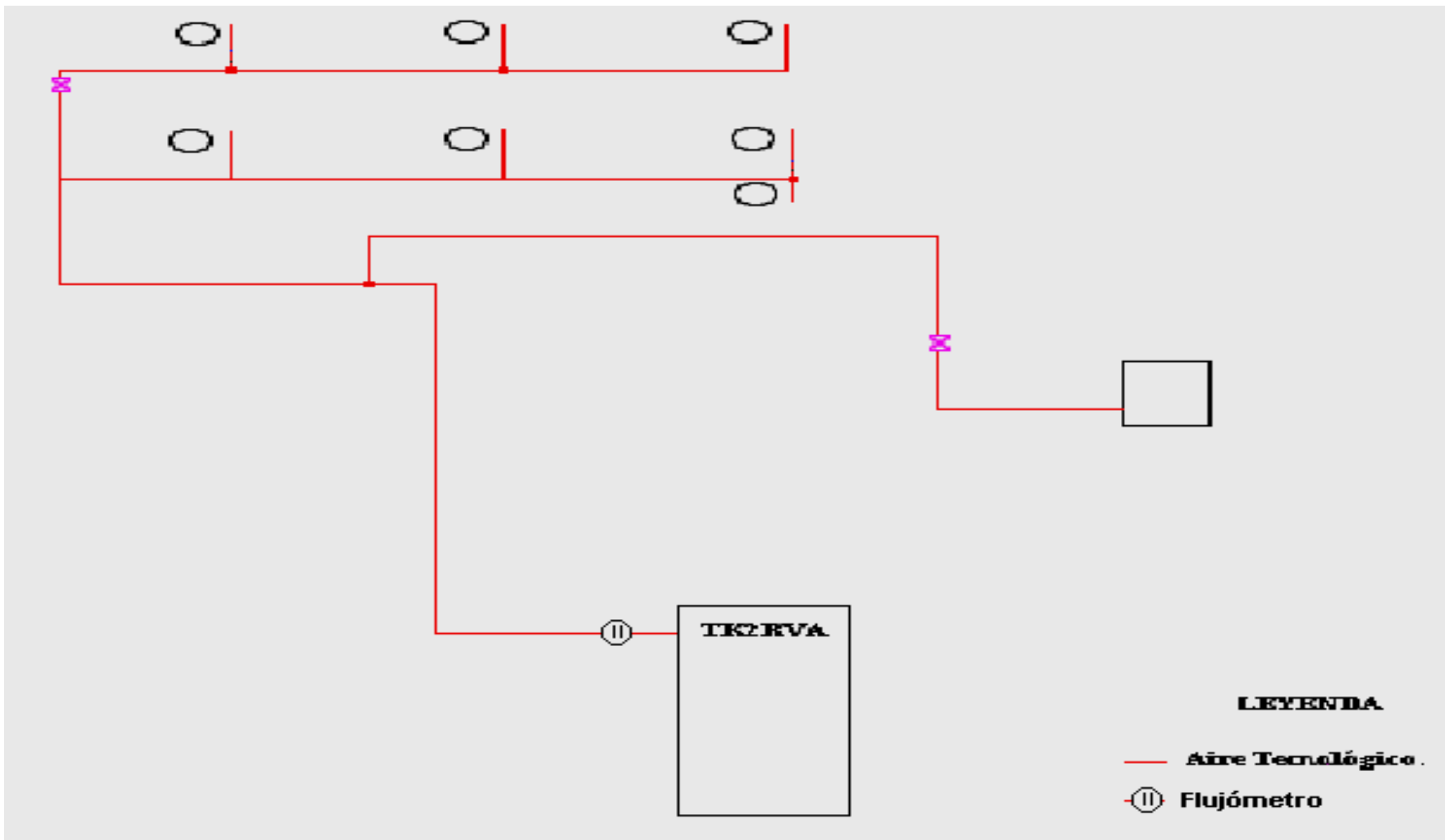
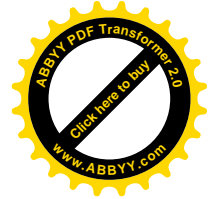
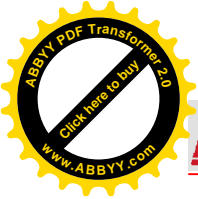
Tipo de compresor	Estado operativo	Caudal (m³/h)	Tipo de aire	Estado técnico
2 BM10-50/8 (11)	Operando	3 000	Servicio	Regular
2 BM10-50/8 (12)	Reserva	3 000	Instrumento	Bueno
2 BM10-50/8 (13)	Reserva	3 000	Servicio e instrumento	* Bueno (reparación capital)
5 HK-265/4,2T (21)	Operando	15 900	Transporte neumático	Regular
5 HK-265/4,2T (23)	Operando	15 900	Transporte neumático	Regular
5 HK-265/4,2T (24)	Operando	15 900	Transporte neumático	Regular
5 HK-265/4,2T (25)	Operando	15 900	Transporte neumático	Bueno
TK2RVA 99 (31)	Operando	40 200	Tecnológico	Regular
TK2RVA 99 (32)	Operando	40 200	Tecnológico	Regular
TK2RVA 99 (33)	Reserva	40 200	Tecnológico	Regular
LK-3-JJ Betico (41)	Operando	1 600	Instrumento	Bueno (reparación capital)
LK-3-JJ Betico (42)	Reserva	1 600	Instrumento	Bueno (reparación capital)
LK-3-JJ Betico (44)	Operando	1 600	Instrumento	Regular
K- 500 (102)	Operando	25 000	Transporte neumático y servicio	Bueno
K- 500 (103)	Reserva	25 000	Servicio	Regular -
Atlas Copco (503)	Reserva (en garantía)	1 800	Instrumento	Bueno



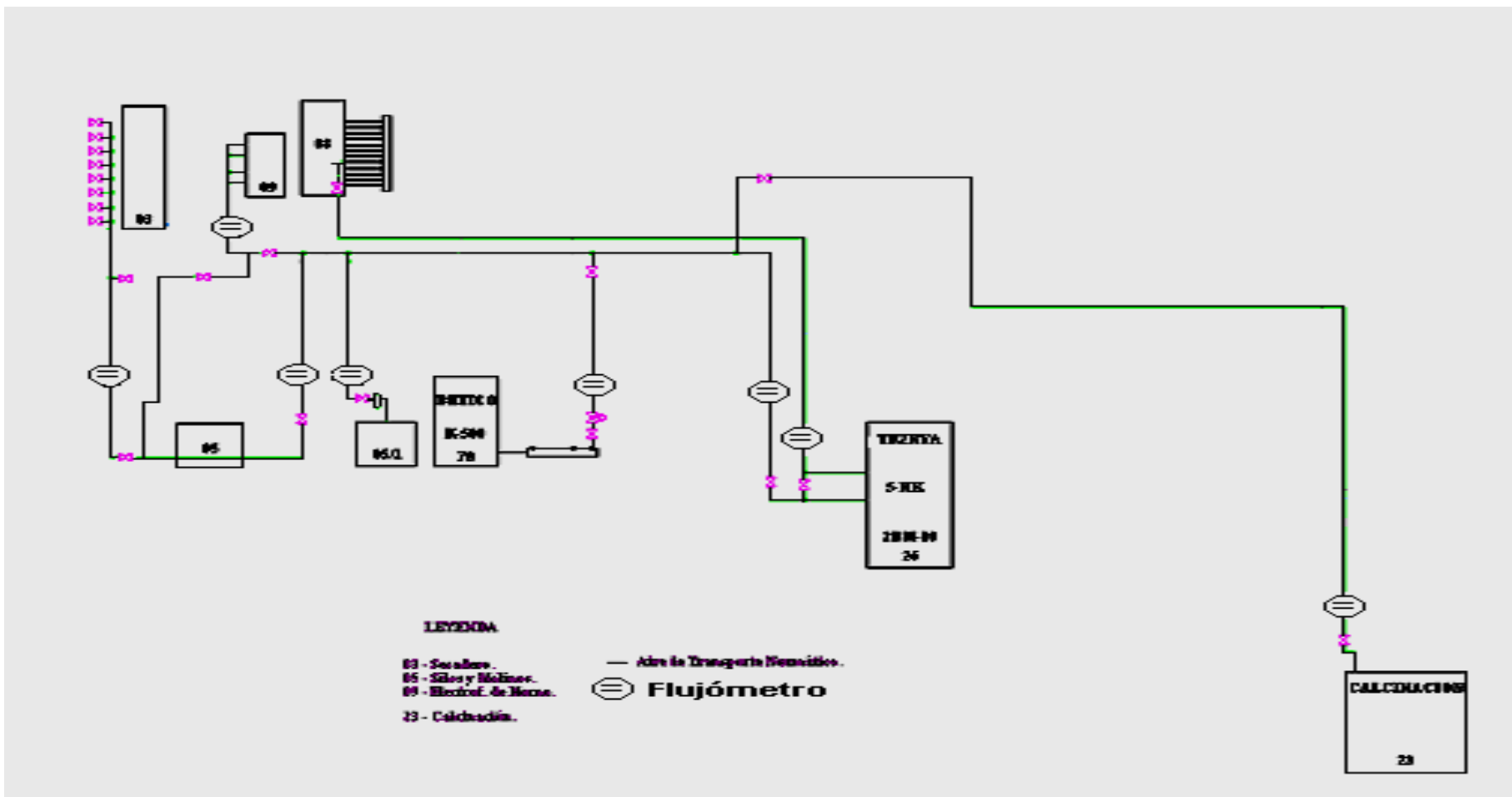
Anexo 4. Ubicación de flujómetros en redes de aire de instrumentos



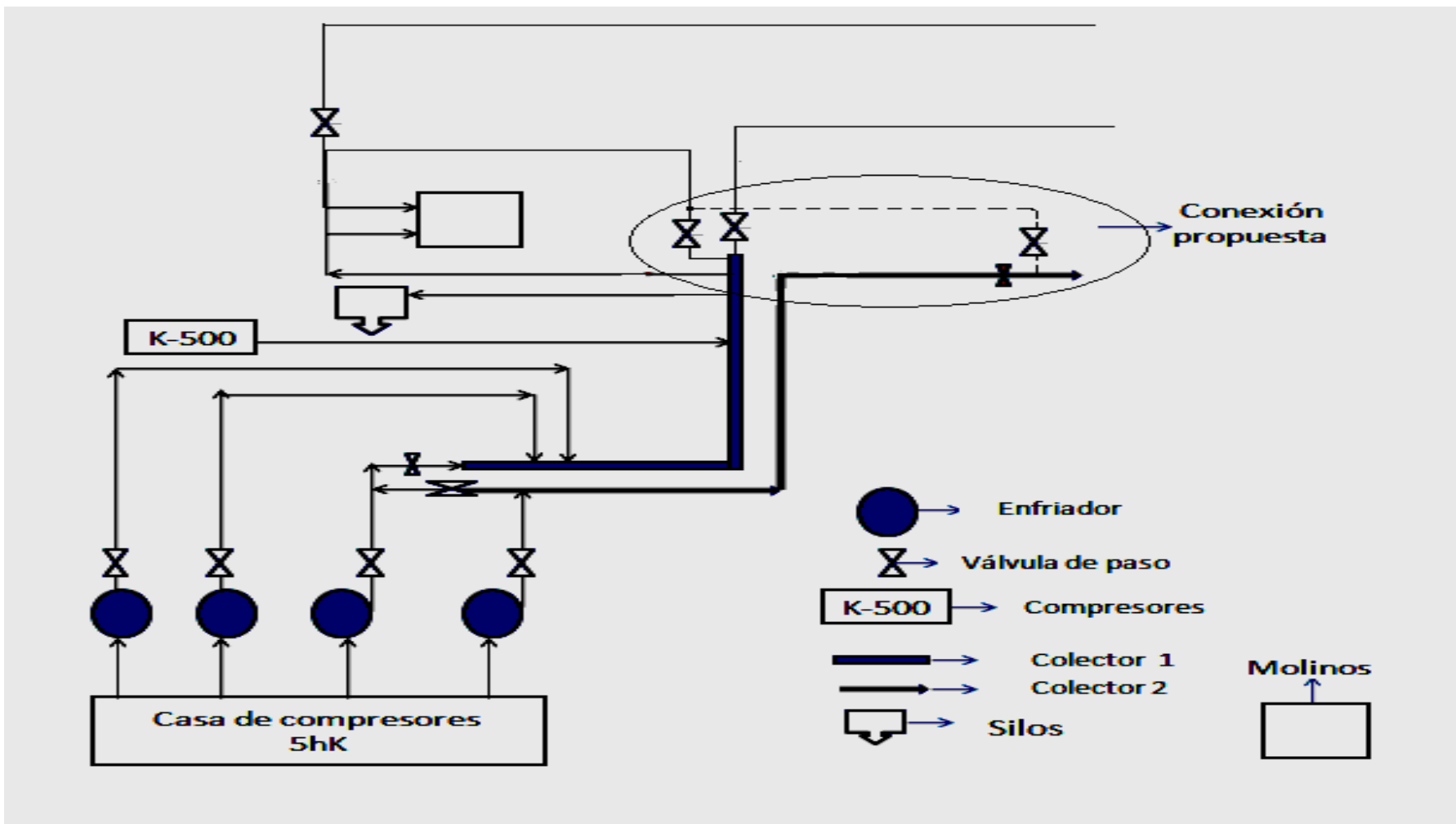
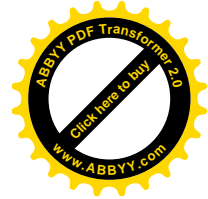
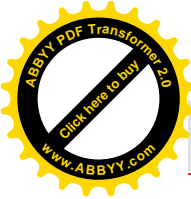
Anexo 5. Ubicación de flujómetros en redes de aire de servicio



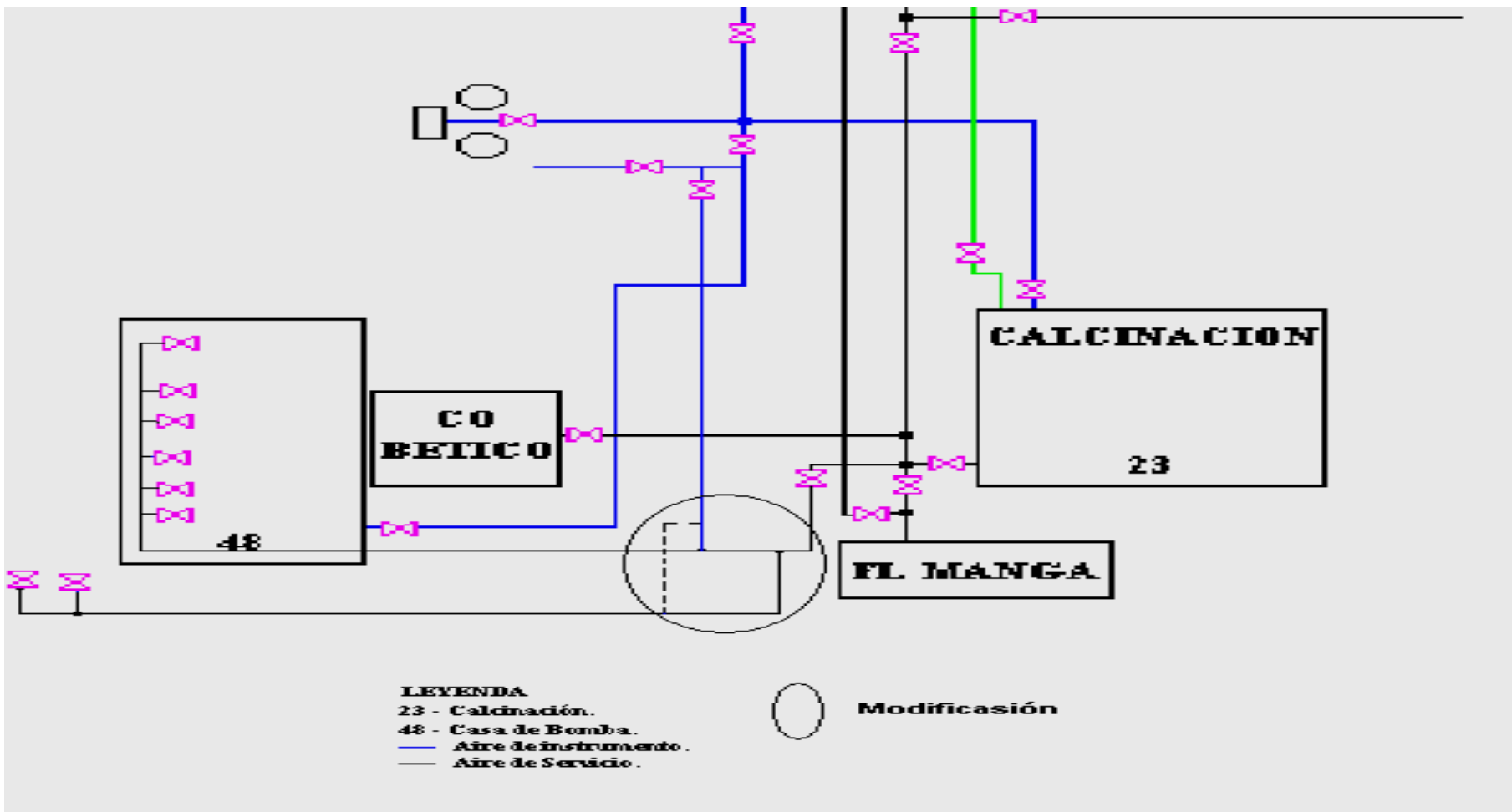
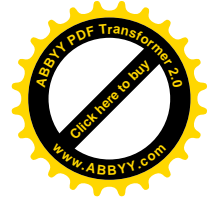
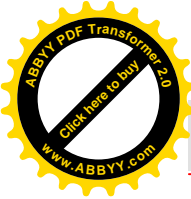
Anexo 6. Instalación de flujómetros en redes de aire tecnológico.



Anexo 7. Instalación de flujómetros en redes de aire de transporte neumático



Anexo 8a. Conexión propuesta e línea de aire para transporte neumático.



Anexo 8b. Propuesta en conexión de línea de aire de servicio con instrumento, en la entrada de la casa de bombas.