

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación y distribución de aire comprimido son de gran importancia para cualquier industria en la actualidad, debido a que existen diversidad de equipos y tareas que requieren de la neumática para operar. Está por demás decir que la industria es cada vez más automatizada, por lo que se requieren fuentes de energía como la neumática para sistematizar operaciones. Es por ello que el estudio de esta disciplina debe ser un foco fundamental para cualquier ingeniero mecánico.

Las pérdidas asociadas con defectos en las redes de distribución de aire, así como los equipos que lo generan son factores que pocas veces se estudian en una operación, y que muchas veces tienen grandes áreas de oportunidad a ser atacadas. Al identificar los problemas en las instalaciones actuales es posible determinar el costo que está representando tener el defecto, y determinar el beneficio que podría obtenerse.

Este trabajo puede dividirse en tres partes principales. La primera consiste en el estudio de la teoría necesaria para poder entender el proceso y los componentes de una red de distribución de aire comprimido efectiva. La segunda se refiere al estudio detenido de los consumos de aire en una planta de empaque y manufactura de líquidos. En esta parte se hizo una división de las operaciones por manufactura y empaque para facilitar la obtención de información así como el análisis del sistema. Y en la tercera parte se priorizaron las pérdidas encontradas en base a los ahorros potenciales que pueden entregar, y se propuso soluciones para las mismas.

La metodología de análisis consistió básicamente en involucrarme directamente en la operación para observar los equipos en funcionamiento, y a la vez investigar para entender el diseño actual y encontrar las áreas de oportunidad a mejorar del mismo. A la vez se realizaron entrevistas con personal de la operación y los ingenieros de proceso del área para obtener la mejor información de los problemas que se han generado por concepto de fallas en los equipos de suministro de aire.

El objetivo principal de este trabajo es proveer un análisis de los defectos y pérdidas encontradas en el sistema de generación y distribución de aire comprimido, y plantear soluciones viables para los problemas cuya eliminación representa una reducción de costo mayor.

II. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

A. Generalidades

1. **El concepto de aire libre.** Cuando se habla de aire libre, se está haciendo referencia al aire atmosférico a la presión y temperatura normales. Las cantidades de flujo volumétrico que se dan por lo general en los catálogos para expresar el consumo de aire de los equipos neumáticos o maquinaria, se refieren a esto. Para que exista correspondencia entre el consumo y la capacidad de un compresor, por ejemplo, es necesario asegurarse que el dato de capacidad que da el fabricante también está referido a aire libre.

Normalmente estas dos especificaciones están dadas en aire libre, por lo cual no se requiere una conversión. Sin embargo, cuando se trata del consumo de aire de otros equipos, es posible que no se dé en aire libre. En este caso es necesario recurrir a la siguiente fórmula para la conversión de litros de aire comprimido a una presión determinada, en litros de aire libre:

$$Q = Q_1 \left(\frac{P + 1.033}{1.033} \right) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Q = litros de aire libre por minuto

Q₁ = litros de aire comprimido por minuto

P = Presión del aire comprimido en Kg/cm² o bars

Debido a que el clima es variable, sería difícil establecer tablas de consumo por cada estado climático distinto. Por ello se hace necesario tener una normativa sobre la base de considerar unas condiciones normales de temperatura y presión del aire aspirado, independientemente de las condiciones atmosféricas a las cuales trabaje el compresor. A este aire se le llama aire normal o aire normalizado, y se distingue con una N (mayúscula) que se situará después de las cifras y antes del volumen expresado. Por ejemplo: 400 Nm³/h equivale a un sistema que proporciona 400 m³/h expresados en condiciones normales.

Según las indicaciones del Compressed Air Gas Institute de EEUU, 1 Nm³/h es un metro cúbico de aire por hora a la temperatura de 20° C a la presión de 1.033 kg/cm² y con una humedad relativa del 36%. En la zona europea, la norma C.E.T.O.P. RP-44P, propone como condiciones atmosféricas normales las que están especificadas en la ISO R 554, y que

corresponden a la temperatura de 20° C a la presión de 1.013 mbar y una humedad relativa del 65%.

El objetivo que se persigue es asegurar un aire libre estable. Sin embargo, el mismo responderá a las condiciones atmosféricas del lugar, independientemente del compresor que se esté utilizando. Por lo tanto esto tendrá un efecto directo en los dispositivos neumáticos del sistema. La presión ambiental y la temperatura disminuyen con la altitud. Estos cambios inciden en la relación de presión del compresor y de las herramientas, y a la vez es necesario considerarlos en cuanto a la potencia disponible de los motores tanto eléctricos como de combustión. Esta variación con la altitud puede observarse en la Tabla 1:

Tabla 1
Efecto de la altitud en el rendimiento volumétrico de un compresor

EFFECTO DE LA ALTITUD EN EL RENDIMIENTO VOLUMETRICO DE UN COMPRESOR					
Altitud (m)	Presión (mm Hg)	Rendimiento volumétrico relativo comparado con el nivel del mar (bar)			
		2.81	4.22	5.62	7.03
Nivel mar	762	100.0	100.0	100.0	100.0
350	733	99.3	99.2	99.2	98.7
600	706	98.7	98.7	97.7	97.2
900	679	98.1	97.4	96.7	95.7
1200	654	97.4	96.3	95.3	94.2
1500	629	96.7	95.3	94.0	92.5
1800	604	96.0	94.5	92.8	90.8
2100	583	95.3	93.6	91.5	89.0
2400	561	94.5	92.5	90.0	87.3
2700	540	93.8	91.5	88.7	85.7
3000	520	93.1	90.2	87.2	84.0
3600	481	91.4	87.8	83.9	80.6
4500	430	88.7	83.6	78.4	75.6

Ahora bien, respecto a las herramientas neumáticas, la potencia de las mismas se mantiene inalterable prácticamente con la altitud, siempre y cuando la presión manométrica a la entrada de la máquina no varíe. Por otro lado, el consumo de aire de las herramientas neumáticas se eleva con una presión ambiente menor. Debido a ello, es importante considerar la altitud en el momento en que se vaya a disponer de un compresor, pues el rendimiento del mismo puede verse afectado de modo relevante.

2. **Magnitudes fundamentales.** Las dos magnitudes fundamentales en la neumática son el caudal y la presión. El caudal se refiere al volumen de fluido que pasa por una determinada sección transversal de una tubería o conducto por unidad de tiempo. Es una

unidad compuesta ya que relaciona el cociente entre unidades de volumen y unidades de tiempo.

La presión es, por definición, el cociente de una fuerza y la superficie que recibe su acción, $P = F/S$. Cuando se trata con esta magnitud, es importante hacer diferencia entre presión atmosférica, efectiva o relativa, y absoluta.

La presión atmosférica viene dada por el peso del aire que se encuentra sobre la superficie de la tierra. A nivel del mar la misma tiene un valor de 760 mm de columna de mercurio o de 10.33 m de columna de agua. Esta presión disminuye con la altitud, como se ejemplifica en la Tabla 2.

Tabla 2
Presión atmosférica a diferentes alturas

PRESION ATMOSFERICA A DIFERENTES ALTURAS			
Altitud en metros	Presión en kg/cm²	Altitud en metros	Presión en kg/cm²
0	1.033	1,000	0.915
100	1.021	2,000	0.810
200	1.008	3,000	0.715
300	0.996	4,000	0.629
400	0.985	5,000	0.552
500	0.973	6,000	0.481
600	0.960	7,000	0.419
700	0.948	8,000	0.363
800	0.936	9,000	0.313
900	0.925	10,000	0.270

Se conoce como presión efectiva o relativa en la práctica corriente a la diferencia entre la presión en un recipiente menos la presión atmosférica. Los instrumentos utilizados para su medición se denominan manómetros.

Y finalmente tenemos la presión absoluta, cuyo concepto se reserva para las presiones referidas al cero absoluto, definiéndose como depresión la diferencia entre el valor de la presión atmosférica y la presión cero absoluto o presión en el vacío (la cual es nula).

De aquí en adelante y salvo en los casos que se especifique lo contrario, al hablar de presión se estará haciendo referencia a la presión relativa, a que para encontrar la presión absoluta se habrá de añadir la presión relativa a la presión atmosférica que corresponda al lugar que se considere bajo la siguiente fórmula:

$$P \text{ abs (Pa)} = P \text{ rel (Pr)} + P \text{ atmosférica} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Las unidades de presión, que comúnmente se utilizan en neumática son el kg/cm^2 , el bar y la atmósfera, pudiéndose llegar a las siguientes identidades:

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ atm} = 1 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

B. Compresores.

Por compresión se entiende el proceso mediante el cual se eleva la presión de un fluido gaseoso por una disminución de su volumen específico. Por consiguiente, un compresor es una máquina destinada a elevar la presión de un fluido gaseoso. Existen varios tipos de compresores, de los cuales se expondrán brevemente los distintos modelos así como las partes que conviene tener en cuenta para su aprovechamiento posterior.

1. Compresores de aire a pistón. Para tener un buen entendimiento de este tipo de compresores, se clasificarán según el número de etapas y el modo de trabajar del pistón.

a. Clasificación de compresores por el número de etapas

Compresores de una etapa. Estos compresores disponen de una simple etapa de compresión. Se componen fundamentalmente de un cárter con cigüeñal, pistón y cilindro. En este tipo de compresores la temperatura de salida del aire comprimido se sitúa alrededor de los 180°C con un rango de variación de $\pm 20^\circ \text{C}$.

Compresores de dos etapas. Son compresores que tienen como característica básica que el aire es comprimido en dos etapas. En la primera (de baja presión) se comprime hasta una presión de 2 a 3 bar., y en la segunda (de alta presión) se comprime hasta una presión de 8 bar. Estos son los más empleados en la industria. La temperatura de salida del aire comprimido está alrededor de los 130°C con un rango de variación de 15°C .

b. Clasificación de compresores por el modo de trabajar del pistón

Compresores de simple efecto. Se dice que un pistón es de simple efecto cuando trabaja sobre una sola cara del mismo y precisamente se trata de la cara dirigida hacia la cabeza del cilindro. La cantidad de aire desplazado es igual a la carrera por la sección del pistón.

Compresores de doble efecto. El pistón es de doble efecto cuando trabaja sobre sus dos caras y delimita dos cámaras de compresión en el cilindro. Así, el volumen desplazado es igual a dos veces el producto de la sección del pistón por la carrera.

Por el número y disposición de los cilindros se tienen diversas formas de montaje, siendo las más frecuentes la disposición vertical, horizontal, en L o en ángulo (90°) y de dos cilindros opuestos. Los compresores verticales se utilizan para potencias bastante pequeñas ya que los efectos de la fuerza producida por esta disposición conducen al empleo de fundaciones bastante pesadas y voluminosas en contraposición de las disposiciones horizontales o en ángulos, las cuales presentan cualidades de equilibrio tales que el volumen de las bases se reduce bastante.

2. Compresores de aire rotativos. Este tipo de compresores producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo, es decir, que empujan el aire desde la aspiración hacia la descarga, comprimiéndolo. Los modelos de más amplio uso industrial pueden clasificarse en compresores de paletas y de tornillo.

a. Compresores de paletas. El principio de funcionamiento de estos compresores se ilustra en la siguiente figura. El rotor cilíndrico R está colocado excéntricamente dentro del hueco tubular del estator E.

La mecánica de operación se basa en que el rotor tiene unas aberturas donde lleva un número de paletas radiales insertas. Cuando el rotor gira accionado por el motor, las paletas se desplazan hacia fuera por la fuerza centrífuga, ajustándose a la pared interior del estator hasta el punto de excentricidad máxima situado en la parte superior del estator. El volumen de aire atrapado en la cámara comprendida entre dos paletas consecutivas se comprime gradualmente mientras que la rotación del aire irá poco a poco disminuyendo y por tanto su presión aumentará por la progresiva reducción del volumen provocando la correspondiente compresión.

b. Compresores de tornillo. Este tipo de compresores puede ser de dos tipos, ya sea de dos rotores o de un solo rotor. Los compresores con los cuales se cuenta en la red de distribución de aire comprimido que se está estudiando son tres, y todos son compresores de tornillo de dos rotores, por lo cual será de vital importancia abordar estos diseños con más detalle.

1) Principio de funcionamiento. El rotor macho tiene cuatro o cinco dientes helicoidales, y engrana con cinco o seis celdas o cámaras de trabajo, igualmente helicoidales del rotor hembra, ambos alojados dentro del estator. Para asegurar el cierre hermético de las cámaras de trabajo, y por lo tanto, la separación de las cavidades de separación e impulsión

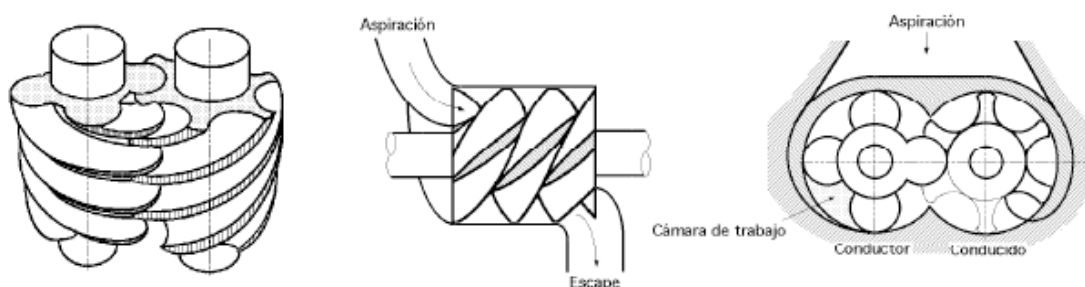
del compresor, la sección transversal de los dientes ha evolucionado desde un perfil circular hasta perfiles cicloidales, con el objetivo de mejorar el funcionamiento mecánico y dinámico de los rotores.

El perfil del tornillo macho es convexo, mientras que el del tornillo hembra es cóncavo. En cuanto a la velocidad de giro, el tornillo macho está conectado al eje del motor y a su vez gira más rápido que el tornillo hembra en una relación 6/4 ó 6/5.

El aire que ingresa por la cavidad de aspiración, ubicada en uno de los extremos del compresor, llena en su totalidad cada una de las cámaras de trabajo helicoidales del tornillo macho. Durante el giro de los rotores, las cámaras de trabajo limitadas entre los filetes de los rotores y las superficies internas del estator dejan de estar en comunicación directa con la cavidad de aspiración y se desplazan junto con el aire a lo largo de los ejes de rotación. A continuación llega un momento en el cual cada una de las cámaras se cierra por uno de sus extremos mediante uno de los dientes del tornillo macho, quedando así contenido un volumen de aire, que queda aislado del aire de aspiración. Es entonces cuando inicia la etapa de compresión, donde el volumen se va reduciendo más, hasta que el aire contenido se pone en comunicación con la cavidad de escape.

En la Figura 1 puede apreciarse un diagrama que ejemplifica en funcionamiento y estructura de un sistema de tornillos helicoidales.

Figura 1
Tornillos de un compresor helicoidal de dos rotores



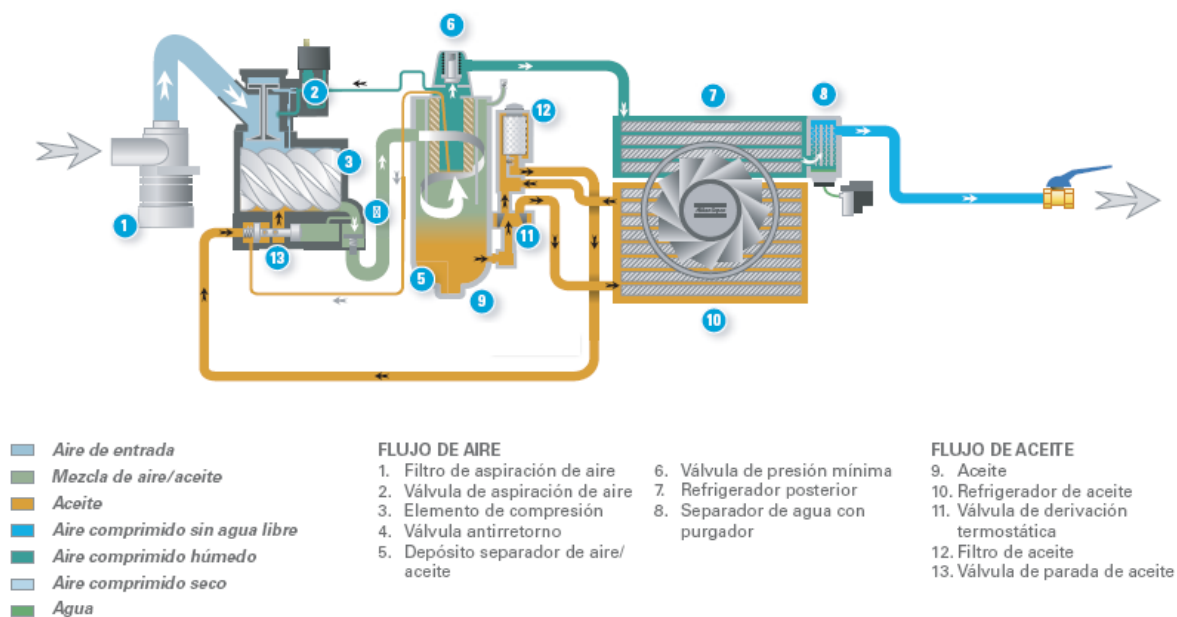
2) Flujo del aire. El aire es aspirado hacia adentro del compresor a través de un filtro y una válvula de admisión. Luego el fluido se introduce en las cámaras de trabajo de los tornillos para ser comprimido. En esta etapa se agrega aceite al proceso, el cual es utilizado para lubricar, sellar los espacios entre las partes en movimiento, absorber el calor desarrollado

en la compresión, disminuyendo la temperatura de escape y por tanto el calor a disipar por el condensador.

El siguiente paso consiste en que el flujo de aire comprimido y aceite ingresan al receptor de aire/separador de aceite a través de una válvula de bola. En este punto la mayor parte del aceite es removido de la mezcla por medio de un proceso centrífugo. El mismo se acumula en la parte inferior del receptor de aire/separador de aceite, mismo que sirve como almacenaje del lubricante. El aire es descargado a través de una válvula de presión mínima de salida, pasando por un enfriador y una trampa de agua.

En la Figura 2 puede apreciarse tanto el flujo del aire desde su entrada al compresor hasta la descarga, así como el flujo de aceite con todos sus componentes.

Figura 2
Flujo de aire y aceite en un compresor de tornillo



C. Depósitos.

Toda instalación de aire comprimido debe de disponer de un depósito de aire a presión entre el compresor y la red de distribución. Para ello es práctica común evitar que la

distancia entre el compresor y el depósito sea muy larga con el fin de reducir las pérdidas por tuberías.

1. **Función.** Existen varias razones por las cuales es imprescindible contar con este equipo en una instalación de aire comprimido. En primer lugar no es posible que el compresor soporte en línea la demanda variable de aire que se tiene en una red. Por ello, una de las funciones principales del depósito es la de hacer frente a las demandas pico de caudal sin que esto provoque una caída de presión en el sistema.

Un depósito tiene otras funciones adicionales. En caso se contara con compresores alternativos, éste amortigua las pulsaciones del caudal de aire. A la vez actúa como distanciador de los periodos de regulación. Y finalmente es el encargado de adaptar el caudal de salida del compresor al consumo real de aire de la red. Teniendo estas funciones en mente, es apropiado mencionar que no se debe confundir un depósito con una fuente de energía por aire, pues, cuando el mismo actúa de acumulador, es para atender una demanda instantánea y no para suministrar aire continuamente.

2. **Capacidad.** Este parámetro del depósito de aire está principalmente determinado por el caudal de aire que puede suministrar el compresor. Sin embargo, el factor determinante para calcular el límite inferior de la capacidad del depósito es el sistema de descarga del compresor. Esto se debe a que si funciona a intervalos muy repetidos se descargará rápidamente. Ahora bien, si el compresor es de regulación automática, la capacidad del depósito en metros cúbicos no debe de ser inferior al caudal del compresor en metros cúbicos por minuto. Esta norma es válida si la variación de presión es de 1.5 bar. De tenerse un diferencial de presión menor o mayor, se puede realizar el cálculo de la capacidad del depósito proporcionalmente a la diferencia de presión.

D. Deshumidificación del aire.

La presencia de condensado de agua en las líneas de aire comprimido y puntos de consumo trae consigo una serie de inconvenientes tales como la corrosión de las tuberías metálicas, entorpecimiento de los accionamientos neumáticos, errores de medición en equipos de control, degradación del poder lubricante de los aceites de engrase, y en general bajo rendimiento de toda la instalación.

1. **Humedad del aire.** Es de conocimiento general que el aire atmosférico contiene una proporción de humedad, la cual varía dependiendo de las condiciones climatológicas, así como de la localidad y estación del año. La capacidad del aire de retener agua en forma de vapor está directamente relacionada con dos factores: la temperatura y la presión, aunque la

primera tiene un efecto más relevante. Cierta volumen de aire con una temperatura más alta y una presión más baja puede retener una cantidad mayor de agua.

Cuando aplicamos este concepto al tema de la distribución y generación de aire comprimido, el mismo tiene un efecto muy importante principalmente en el aire de aspiración del compresor. El mismo entra a la presión y temperatura ambiente, se comprime a una presión mayor y en el proceso se eleva la temperatura como resultado del ciclo de compresión. Como consecuencia se tendrá que toda la humedad contenida en el aire pasará por el compresor al ser aspirado.

Durante la distribución del aire, el mismo se irá enfriando primero en el depósito y luego en las tuberías de distribución hasta igualar la temperatura ambiente, condensando la mayor parte del vapor en forma de gotas de agua, mismas que serán arrastradas por el flujo de aire hacia los lugares de utilización. Este es uno de los principales problemas que se tiene con la utilización de aire comprimido en una operación, ya que los dispositivos neumáticos de consumo se pueden ver seriamente afectados por la presencia de agua en el aire.

2. Procedimientos de deshumidificación. Para el secado o deshumidificación del aire comprimido, se pueden separar los procedimientos en tres apartados bien definidos: tratamiento del aire a la salida del compresor, tratamiento del aire en las redes de distribución y tratamiento en los puntos de utilización.

a. Tratamiento del aire a la salida del compresor.

1) Refrigerador posterior de agua. Es el más utilizado de los elementos existentes para disminuir el contenido de humedad en el aire comprimido. El mismo se coloca inmediatamente después del compresor, y normalmente se logra condensar entre un 50% y 80% de toda la humedad que aspira el compresor. Los refrigeradores por agua consisten básicamente en un haz de tubos por cuyo interior pasa el aire. El agua de enfriamiento circula a contracorriente del aire por el exterior de los tubos.

Para tener una óptima eficiencia del refrigerador o secador, es importante que la temperatura del agua utilizada para la refrigeración sea lo más fría posible. Esto si se desea que el aire comprimido salga del refrigerador a una temperatura lo más cercana a la temperatura ambiente. De esta manera se tendrá por seguro la eliminación de la mayor parte de la humedad que se tenía. De acuerdo con los textos consultados, se encontró que un

refrigerador de alto rendimiento es aquél que logra una diferencia de 5 a 7° C entre la temperatura de salida del aire y la temperatura de entrada del agua.

En cuanto a la instalación del refrigerador hay ciertos puntos importantes a considerar. Es necesario colocar el mismo inmediatamente después del compresor en la tubería de impulsión. En adición a ello, el agua debe circular obligatoriamente en sentido contrario al aire. Es deseable también conocer con exactitud la temperatura de salida del aire del compresor y la temperatura del agua de refrigeración, ya que ambos datos determinan el tipo de refrigerador más conveniente.

2) Refrigerador posterior de aire. Es un intercambiador de calor de batería aleteada que aprovecha el aire ambiente como fluido refrigerante. Al igual que con los refrigeradores de agua, es imprescindible colocarlo a la salida del aire del compresor. Se aplican cuando el agua es escasa o no resulta sencillo llevarla hasta el punto requerido para la refrigeración. En caso contrario siempre es más recomendable colocar un refrigerador posterior de agua.

3) Secadores. Son equipos cuya finalidad es reducir el contenido de vapor de agua. Para tener una depuración efectiva del fluido comprimido, es necesario que vayan acompañados de un refrigerador o radiador con al idea de corregir la temperatura y que esta no sea superior a 25 ó 30° C a la entrada del equipo secador. También es recomendable un separador o filtro como elemento protector de suciedad y partículas sólidas así como el contenido de aceite.

El secador constituye la última etapa en la depuración del aire y presenta varias ventajas ante un sistema que no cuenta con este equipo. Dentro de las ventajas puede mencionarse que se tiene un punto de rocío constante, independientemente de la carga. Adicional a ello se reducen los gastos de mantenimiento de la maquinaria y herramientas, así como el costo de la instalación de la red. Y por último se evita la corrosión, teniendo una humedad relativa inferior al 35% en plantas de aire comprimido interiores.

Los secadores pueden ser frigoríficos o de adsorción. Los primeros se caracterizan por tener un amplio campo en la industria en general. Los de adsorción son apropiados para suministrar aire seco a instrumentación neumática, transporte neumático de productos a granel higroscópicos, industrias químicas y petroquímicas, protección de circuitos eléctricos y en general aplicaciones en donde se precise una alta sequedad del aire.

La instalación que se está evaluando cuenta con tres secadores frigoríficos, por lo que este tipo de secadores se estudiarán más a detalle. Este secador actúa a base de medios frigoríficos y tiene como meta reducir la humedad en el aire comprimido, por enfriamiento del mismo hasta la mínima temperatura funcionalmente posible, que oscila entre 2° C y 3° C a la presión de servicio. Es importante hacer ver que este tipo de equipos tienen un consumo de energía reducido, ya que sólo gastan la misma en el compresor de freón y el ventilador del condensador.

Los secadores frigoríficos se componen de los siguientes elementos citados a continuación:

- Compresor de frío
- Regulador de capacidad
- Condensador
- Depósito del refrigerante
- Economizador
- Evaporador
- Separador de condensados

Para la selección de un secador frigorífico tiene que conocerse el caudal nominal de aire en Nm³/h o en Nm³/min y la presión de trabajo y, desde luego, en función del punto de rocío deseado.

b. Tratamiento del aire en las redes de distribución. Hasta el momento se han tratado opciones para el secado del aire a la salida del compresor, sin necesidad de colocar ningún componente adicional en las redes de distribución. Sin embargo en muchas industrias no se precisa de un aire completamente seco para toda la operación. Ello conlleva a tratar el aire parcialmente en vez de en su totalidad con la idea de reducir los costos de instalación que no serían necesarios o críticos para la operación.

Algunas de las opciones que se tienen para instalar en las redes de distribución son las siguientes:

1) Secadores por deliquesencia. Este tipo de secador utiliza partillas desecantes y deliquescentes, de composición química y de granulado sólido altamente higroscópico, que funden y licúan al ir reteniendo el vapor de agua contenido en el flujo a secar.

2) Filtros separadores cerámicos. La función consiste en eliminar los condensados que salen del aire comprimido a partir del refrigerador posterior. Estos filtros están diseñados para eliminar entre un 70 y 80% del agua y aceite contenidos en el aire. Los mismos han de instalarse a continuación del depósito de aire y alejado del compresor para que el aire se refrigere antes de entrar en ellos.

Dependiendo del tamaño de la red de distribución puede colocarse un solo separador antes del nudo repartidor. Si la red tiene demasiadas ramificaciones con longitudes a considerar, puede disponerse un filtro antes del nudo y uno a la entrada de cada línea secundaria.

Estos filtros cerámicos realizan la separación de los condensados en tres etapas. La primera etapa consiste en que un separador por gravedad se encarga de eliminar las partículas líquidas y sólidas de tamaño mayor que se recogen en el fondo del separador. En la segunda etapa una malla filtrante se dedica a eliminar las partículas líquidas y sólidas de tamaño intermedio, las cuales se depositan por densidad en el fondo. Finalmente el aire depurado de partículas en las dos etapas anteriores atraviesa una serie de bujías cerámicas, destinadas a eliminar las más finas partículas de tamaño superior a 10 micrones.

Puede surgir como interrogante el inconveniente de la pérdida de carga en el sistema. Sin embargo debido al tratamiento superficial de las bujías, éstas no se impregnan, por lo que la pérdida de carga es baja y muy constante en el transcurso del tiempo.

3) Separadores centrífugos. Cuando se requiere una separación de condensados a un coste económico se recurre a este tipo de separadores. Sin embargo tienen varias desventajas como pérdidas de carga altas, además si se tiene un pequeño descenso en la velocidad se tiene una caída grande en la aceleración de las partículas por lo que como resultado se tiene una disminución de la eficiencia del separador.

4) Desoleadores. La misión de los desoleadores es distinta a los separadores, sin embargo cabe incluirlos en este grupo. De cualquier forma, su función es la retención de los vapores de aceite que saturan el fluido. Sucede que el aceite quemado que proviene del compresor provoca que los aceites dedicados a engrasar las máquinas neumáticas pierdan sus propiedades, causando un deterioro forzado de los órganos internos.

Es importante hacer notar que la temperatura del aire comprimido que reciban no debe superar los 40° C. En caso contrario sería necesario preenfriar el fluido a desolear. La eficiencia de separación llega a ser hasta de 96%.

c. Tratamiento del aire en los puntos de utilización. A pesar de la instalación de equipos para eliminar la humedad y partículas del aire antes de su utilización, el mismo siempre tiene residuos de aceite y vapor de agua, así como impurezas. Es conveniente por ello eliminarlas mediante la colocación de filtros en la línea de actuación del aire.

Por otro lado, mientras los elementos neumáticos reciban una presión de aire más constante, menor será la cantidad de esfuerzos inadmisibles que soporten por fluctuaciones. Esto resultará en un aprovechamiento de la vida útil de los equipos. De igual forma los elementos neumáticos deben de lubricarse para mantener duración y rendimiento en los mismos, por lo que es necesario incorporar al sistema filtros, reguladores de presión y lubricadores.

III. SISTEMA ACTUAL DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

A. Consumos de aire comprimido en planta

El sistema de distribución de aire comprimido es uno de los más importantes y críticos para la operación de la planta en estudio, principalmente debido a la gran cantidad de equipos neumáticos y maquinaria que es accionada con este tipo de energía. Aunado a ello se tiene el hecho de que los requerimientos de mercado han mostrado un crecimiento importante en el último año, por lo que cada vez es mayor la necesidad de producción. Esto se traduce en que la planta debe de estar en operación prácticamente los 365 días del año, 24 horas al día, exceptuando los tiempos asignados a paros operacionales por mantenimientos planeados. Por ello, los sistemas de la planta deben ser cada vez más confiables para garantizar el suministro correcto de producto en base a una demanda creciente.

La planta puede estudiarse dividiéndola en dos grandes áreas que son: la operación de empaque y la operación de manufactura. Se realizará una descripción general de la operación de cada área y el estudio de los requerimientos.

1. **Operación de empaque.** La operación de empaque a su vez tiene cuatro áreas en las cuales se puede dividir para efectos del estudio de los requerimientos de aire comprimido. Estas cuatro áreas son: la línea de empaque de bolsas de 210 ml, la línea de empaque de bolsas de 260 ml, la línea de llenado de botellas, y la línea de soplado de envases de polietileno.

a. **Línea de empaque de bolsas de 210 ml.** Esta sección del empaque consta de tres líneas, cada una con 6 máquinas llenadoras verticales, para un total de 18 máquinas cuya estructura, funcionamiento y capacidades son idénticos. Cada una cuenta con un sistema de sellado por resistencias de impulso, y trabajan a una velocidad de empaque de 32 bolsas por minuto.

El aire comprimido se utiliza básicamente en estas máquinas para realizar cinco tareas. Siguiendo el flujo normal del proceso, el primer punto de consumo se tiene en un cilindro neumático diseñado en planta, de doble efecto, que sirve para controlar el llenado del tanque que contiene el cloro a empacar. Este tanque tiene una capacidad de 250 litros y se ubica en la parte superior de la llenadora, por lo que el cloro desciende por gravedad.

El segundo punto de consumo en el proceso se tiene en un cilindro neumático dosificador también de doble efecto. Tiene la función de regular la cantidad de cloro a empacar, la cual es de 210 ml por bolsa. Esta parte del proceso debe de estar muy bien controlada debido a que por regulaciones de calidad, la cantidad a empacar por cada bolsa debe de ser muy precisa. Ello se debe a que empacar una cantidad menor del establecido resultaría en una falta al consumidor, y el empaque de una cantidad mayor, tomando en cuenta el volumen de producción, resultaría para la empresa en una pérdida grande por sobre empaque.

Las bolsas en las que se empaca se forman a partir de una bobina de película de polietileno que a través de un tubo formador adquiere la forma deseada. Debido al tipo de material de empaque y el manejo del producto terminado, el sellado es de gran importancia, y a su vez divide en sellado horizontal y vertical. El tercer punto de consumo en estas máquinas se tiene en otro cilindro neumático de doble efecto que proporciona el impulso necesario para que a través de una mordaza se realice el sello vertical de la bolsa.

Como cuarto punto de consumo se tiene un cilindro neumático más de doble efecto cuya función es proveer de movimiento a otra mordaza para hacer el sello horizontal de las bolsas. Y finalmente el quinto punto de consumo se da en el cilindro neumático de doble efecto, y tiene como función el sistema de codificado de cada bolsa producida. En este punto se coloca a cada bolsa fecha de producción, turno y número de máquina, con lo cual se tiene toda la información necesaria para garantizar la trazabilidad del producto en caso de algún problema de calidad. Es además parte vital del proceso para retroalimentar la operación cuando se tienen cajas con problemas de fugas, pues con esta información se puede atacar problemas desde su causa raíz.

Para el control del flujo de aire comprimido las máquinas cuentan con un regulador principal, así como cinco electroválvulas de tres vías que están conectadas e un PLC donde se encuentra programada la apertura y cierre de válvulas con base a los tiempos requeridos para tener la dosificación y sellado adecuado. Cuenta la máquina también con una unidad de mantenimiento para la correcta lubricación de los dispositivos neumáticos. La presión de operación es de 8 bar en todo momento.

Para calcular el consumo de aire en cilindros neumáticos se requiere en primer lugar conocer el diámetro del cilindro, su carrera, el número de carreras y la presión de servicio. De esta forma se tiene que para un cilindro de doble efecto el consumo es:

$$Q = 2 (s * n * q) \quad (\text{N litros/min})$$

Q = Consumo de aire total en N litros/min

q = Consumo de aire por centímetro de carrera en N litros/min

s = Carrera en cm

n = Número de carreras por minuto

El consumo de aire por centímetro de carrera se ha calculado a partir de la siguiente tabla, extraída del texto de Aire Comprimido de Carnicer Royo.

Tabla 3
Consumo de aire en litros por centímetro de carrera del cilindro

Presión de trabajo en bar										
Diámetro cilindro mm	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	0.0011	0.0014	0.0016	0.0019	0.0022	0.0025	0.0027	0.003	0.0033	0.0036
12	0.004	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.01	0.012	0.013	0.014
16	0.008	0.01	0.011	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
25	0.019	0.024	0.029	0.033	0.038	0.043	0.048	0.052	0.057	0.062
35	0.038	0.047	0.056	0.066	0.075	0.084	0.093	0.103	0.112	0.121
40	0.049	0.061	0.073	0.085	0.097	0.11	0.122	0.135	0.146	0.157
50	0.077	0.096	0.115	0.134	0.153	0.172	0.191	0.21	0.229	0.248
70	0.15	0.187	0.225	0.262	0.299	0.335	0.374	0.411	0.448	0.485
100	0.307	0.383	0.459	0.535	0.611	0.687	0.763	0.839	0.915	0.991
140	0.601	0.75	0.899	1.048	1.197	1.346	1.495	1.644	1.793	1.942
200	1.227	1.531	1.835	2.139	2.443	2.747	3.052	3.356	3.66	3.964
250	1.916	2.392	2.867	3.342	3.817	4.292	4.768	5.243	5.718	6.193

Con esta información se realizó el cálculo de consumo de aire de una máquina llenadora, tomando en cuenta los cinco puntos de consumo. En la siguiente tabla se tiene el consumo total por cada cilindro neumático, así como información de la marca, modelo y dimensiones de los mismos.

Tabla 4
Consumos de aire de una máquina de empaque de 210 ml

Consumos de aire de una maquina en empaque de bolsas 210 ml								
Cilindro	Aplicación	Marca/modelo	Diámetro (cm)	Carrera (cm)	Carreras por min	Lt/cm de carrera	Consumo específico Lt/min	Consumo específico cfm
1	Llenado de tanque	Diseñado en planta	4.00	5.00	1	0.1100	1.10	0.04
2	Dosificación	Diseñado en planta	3.50	4.00	32	0.0840	21.50	0.76
3	Sello vertical	Festo/ADVU-25-25-P-A	2.50	2.50	32	0.0430	6.88	0.24
4	Sello horizontal	Festo/DNC-32-100-PPV-A	3.20	10.00	32	0.0717	45.89	1.62
5	Codificado	Festo/ADVU-25-25-P-A	2.00	2.50	32	0.0430	6.88	0.24

Si sumamos los consumos específicos en pies cúbicos por minuto de los cinco cilindros neumáticos, tenemos que una máquina consume en total 2.91 scfm. La producción con una, dos o tres líneas dependen básicamente de dos cosas: los niveles de inventario y la necesidad de embarque. El plan de producción es alimentado de esta información y en base a eso se decide la utilización de las líneas. Sin embargo, la mayor parte del tiempo están trabajando ya sean dos o tres líneas, teniendo operación de una línea únicamente los días domingo en el turno de noche, en ocasiones que se requiera.

Los consumos de aire con base a la utilización de líneas de producción puede observarse en la Tabla 5.

Tabla 5
Consumos de aire dependiendo del uso de líneas de producción

Consumos de aire variando el uso de líneas			
Líneas	Máquinas	Consumo Lt/min	Consumo cfm
1	6	493.51	17.43
2	12	987.02	34.86
3	18	1,480.54	52.29

b. Línea de empaque de bolsas de 260 ml. Ésta es una línea que recién se está incorporando a la operación del empaque. Cuando se tiene un nuevo equipo que represente demanda de aire comprimido en la planta, es vital hacer un análisis de los consumos actuales así como los nuevos. Esto para asegurar que con la infraestructura actual se puede suministrar y soportar de manera confiable la producción, o bien tomar la decisión de adquirir nuevos equipos en caso la maquinaria instalada no sea suficiente para suplir los requerimientos.

La línea consta de una única máquina, la cual es una llenadora horizontal que a su vez realiza el sellado de las bolsas. Este equipo cuenta con una velocidad de producción de 90 bolsas por minuto, para lo cual emplea cuatro boquillas de dosificado. La diferencia con la línea estudiada en el inciso anterior radica en que el llenado es horizontal, las bolsas en las que se empaca contienen 50 ml adicionales de cloro y la estructura de las mismas les permite sostenerse paradas por sí solas.

Para esta máquina se tiene que la presión de operación en los equipos neumáticos es de 8 bar. Los consumos de aire comprimido se tienen en 6 cilindros neumáticos de doble efecto, de los cuales 4 se utilizan para la dosificación del producto. Para el llenado de las

bolsas se realiza una dosificación en dos etapas, utilizando para la primera etapa 2 cilindros y otros 2 para completar el volumen de llenado.

Respecto al resto de consumos, uno de los cilindros restantes se utiliza para operar unas pinzas con las que se alimenta el material de empaque a la máquina. Para este equipo se compran bolsas laminadas ya formadas y listas para llenar, a diferencia de las líneas de 210 ml que utilizan película. El último punto de consumo es un cilindro más que provee movimiento para un sistema de remoción de goteo (cortahilos). Se realizó el mismo análisis de consumos que con las líneas de empaque de 210 ml, con la idea de determinar qué demanda adicional se tiene en el sistema por este equipo. La información se resume en la tabla que se encuentra a continuación.

Tabla 6
Consumos de aire en la línea de empaque de 260 ml

Consumos de aire en la línea de empaque para bolsas 260 ml								
Cilindro	Aplicación	Marca/modelo	Diámetro (cm)	Carrera (cm)	Carreras por min	Lt/cm de carrera	Consumo específico Lt/min	Consumo específico cfm
1	Dosificación	Festo/DNC-32-25-PPV-A	3.20	2.50	45	0.0717	16.13	0.57
2	Dosificación	Festo/DNC-32-25-PPV-A	3.20	2.50	45	0.0717	16.13	0.57
3	Dosificación	Festo/DNC-32-25-PPV-A	3.20	2.50	45	0.0717	16.13	0.57
4	Dosificación	Festo/DNC-32-25-PPV-A	3.20	2.50	45	0.0717	16.13	0.57
5	Material empaque	Festo/DNC-32-50-PPV-A	3.20	5.00	90	0.0717	64.53	2.28
6	Cortahilos	Festo/ADVU-25-25-P-A	2.00	2.50	9	0.0430	1.94	0.07

Como resultado del análisis de los requerimientos de aire por parte de la línea de empaque de bolsas de 260 ml, se tiene que el consumo total de la máquina es de 4.63 scfm, operando a una presión de 8 bar. Este requerimiento se mantendrá durante la operación de este recurso de producción, a diferencia del consumo variable que se tiene en las líneas de empaque de 210 ml, dependiendo del número de líneas que se utilicen.

c. Línea de llenado de botellas. Este recurso de producción tiene un consumo de aire bastante reducido, sin embargo debe de tomarse en cuenta ya que cobra importancia cualquier requerimiento cuando se está llegando a utilizar toda la capacidad de suministro de un compresor.

Este recurso se constituye de tres máquinas que llevan a cabo todo el proceso de producción: una llenadora horizontal, una taponadora y una etiquetadora. Los envases son alimentados por medio de una banda transportadora hacia la llenadora. El recurso tiene la

capacidad de producir dos presentaciones distintas de botellas, siendo estas de 1 Litro y 3.785 Litros. Además se pueden producir dos versiones distintas, una perfumada y una regular, con lo cual se tiene la flexibilidad de producir litro regular, litro perfumado, galón regular y galón perfumado. La línea cuenta con distintas velocidades de producción dependiendo de la presentación, las mismas pueden apreciarse en la Tabla 7:

Tabla 7
Velocidades de producción de línea de llenado

Presentación	Versión	Velocidad de producción
Litro	Regular	40 Litros/min
Litro	Perfumado	33 Litros/min
Galón	Regular	20 Galones/min
Galón	Perfumado	17 Galones/min

Los consumos de aire comprimido se tienen en la llenadora, en el proceso de dosificación, para lo cual se utilizan 10 válvulas neumáticas, una por cada boquilla de llenado. Los consumos para este tipo de válvulas oscilan entre 1 y 2 scfm, por lo que se asumirá el consumo de 1.5 scfm por válvula lo que representa 15 scfm en total.

d. Línea de soplado de envase. El soplado de envases en la planta se lleva a cabo en una máquina sopladora de dos cavidades, que es capaz de producir dos tamaños distintos de envase, siendo estos de litro y galón. El consumo de aire en esta área es muy importante, pues gran parte del proceso es realizado por movimiento generado a partir de cilindros neumáticos, y principalmente porque la producción de envases se basa en el soplado del material dentro de unos moldes especiales.

Los cambios de presentación se llevan a cabo aproximadamente una vez por semana, teniéndose un volumen de producción de 55% en tamaño de litro y 45% en tamaño de galón. Las materias primas que se utilizan para la producción de envases son resina virgen de polietileno y masterbatch.

En la Tabla 8 pueden apreciarse las velocidades de producción que caracterizan a la máquina sopladora.

Tabla 8
Velocidades de producción de la sopladora de envases

Presentación	Versión	Velocidad de producción
Litro	Única	1,440 Envases/hora
Galón	Única	720 Envases/hora

Al hacer la evaluación de los consumos de aire comprimido para este recurso de producción, se pudo identificar que el aire se utiliza básicamente para llevar a cabo cinco tareas distintas. Se tuvo la oportunidad de ver los equipos neumáticos con los que cuenta la sopladora debido a que se estaba realizando un mantenimiento planeado de la misma, por lo que pudo apreciarse de mejor manera los puntos de consumo.

Los pasos elementales para la producción de envases de polietileno son la composición de la mezcla, alimentación al tornillo extrusor, dosificación de la mezcla, moldeado, soplado, probado, enfriamiento, y transporte a la línea de llenado. Cuando la mezcla ya cuenta con las características deseadas, la misma es bombeada hacia una tolva que se encuentra en la parte superior del tornillo extrusor.

Cuando la mezcla se encuentra en la punta del tornillo ésta debe ser dosificada por medio de la manga del cabezal. Luego que la mezcla baja por cada una de las mangas, la misma es capturada por los moldes, estos moldes se mueven por medio de una bomba hidráulica que permite el movimiento de los pistones hidráulicos que sostienen el molde.

En el momento que la mezcla de polietileno está ya dentro del molde, la misma es soplada dentro de éste, resultando en el proceso la formación del envase. Los dispositivos que se encargan de soplar el aire dentro del molde son los sopladores, existe un soplador para cada molde y su diámetro es muy importante ya que debe penetrar el molde y sellarlo por completo para evitar fugas de aire. Este es el primer punto de consumo de aire comprimido en el proceso. Para generar el movimiento lineal vertical de los pines de soplado, se utilizan dos cilindros neumáticos, ya que se tiene un soplador para cada molde. Estos cilindros realizan la segunda tarea que requiere el uso de aire.

Posteriormente al soplado se tiene el corte de las rebabas de la parte superior e inferior del envase. Para realizar esta tarea se utilizan dos pistones neumáticos que se encargan de sostener el envase, y dos más que proporcionan el movimiento necesario para que el corte se lleve a cabo. Estas rebabas no es material que se pierda en el proceso, pues se

tiene un sistema de reutilización en el cual el polietileno se vuelve a incorporar al proceso de elaboración de la mezcla.

Al final se tiene una última tarea que involucra el uso de pistones neumáticos. En este caso son cuatro los cilindros empleados y su función es colocar un probador para detectar la presión que soporta el envase sin tener fuga de aire. Después de este proceso ya se obtiene el envase y el mismo se hace pasar por diversas pruebas para asegurar que tiene todas las características requeridas para poder ser utilizado en la llenadora y convertido en producto terminado.

Los consumos de aire comprimido serán analizados tanto para la producción de litro como para la producción de envase galón, debido a que la velocidad de producción es distinta, y el volumen de aire varía dependiendo de la presentación que se esté soplando. En la Tabla 9 y 10 se detallan los consumos para la producción de envase litro y galón.

Tabla 9
Consumo de aire en operación de soplado de envases litro

Consumos de aire en el soplado de envases litro									
Tarea	Dispositivo	Marca/modelo	Cantidad	Diámetro (cm)	Carrera (cm)	Carreras por min	Lt/cm de carrera	Consumo específico Lt/min	Consumo específico cfm
1	Soplador	Pines de soplado	2	-	-	12	27.0000	648.00	22.88
2	Cilindro	Festo/DNC-32-160-PPV-A	2	3.20	16.00	12	0.0561	43.08	1.52
3	Cilindro	Festo/DNC-32-250-PPV-A	2	3.20	25.00	12	0.0561	67.32	2.38
4	Cilindro	Festo/DNC-40-200-PPV-A	2	4.00	20.00	24	0.0850	163.20	5.76
5	Cilindro	Festo/DNC-50-500-PPV-A	4	5.00	50.00	12	0.1340	643.20	22.71

Tabla 10
Consumo de aire en operación de soplado de envases galón

Consumos de aire en el soplado de envases galón									
Tarea	Dispositivo	Marca/modelo	Cantidad	Diámetro (cm)	Carrera (cm)	Carreras por min	Lt/cm de carrera	Consumo específico Lt/min	Consumo específico cfm
1	Soplador	Pines de soplado	2	-	-	6	142.0000	1704.00	60.18
2	Cilindro	Festo/DNC-32-160-PPV-A	2	3.20	16.00	6	0.0795	30.53	1.08
3	Cilindro	Festo/DNC-32-250-PPV-A	2	3.20	25.00	6	0.0561	33.66	1.19
4	Cilindro	Festo/DNC-40-200-PPV-A	2	4.00	20.00	12	0.1220	117.12	4.14
5	Cilindro	Festo/DNC-50-500-PPV-A	4	5.00	50.00	6	0.1910	458.40	16.19

Con base a los resultados del análisis de consumos para ambas presentaciones, se tiene que para soplado de envases litro la operación consume un total de 55.26 scfm a una presión de 6 bar, mientras que para soplado de envases galón la operación consume 82.77 scfm a una presión de 9 bar. La diferencia principal radica en que los sopladores requieren

una cantidad de aire mucho mayor para lograr soplar adecuadamente la mezcla de polietileno para producir un envase de casi 3.785 veces el volumen de litro.

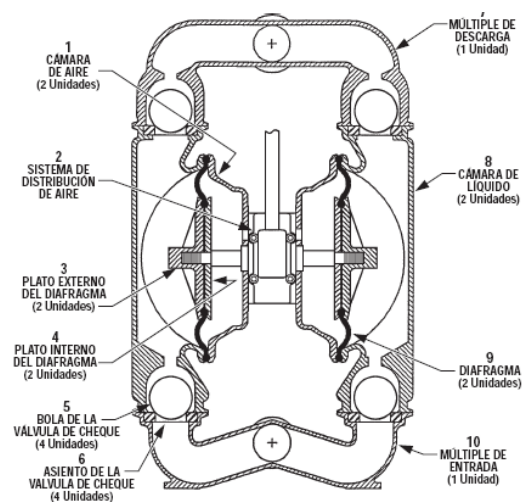
2. Operación de manufactura. La operación de manufactura a su vez se divide en dos áreas principales de acuerdo con el flujo del proceso. Estas dos secciones son el área de manufactura de hipoclorito y manufactura de cloro. A continuación se estudiará a detalle los consumos de aire comprimido en las dos áreas.

a. **Manufactura de hipoclorito.** Este recurso de producción es el primer paso en el proceso de manufactura y empaque de cloro. Para ello se utiliza como materia prima principal grandes cantidades de una sal de muy alta pureza y características específicas, y algunos otros materiales en menores cantidades como carbonato de sodio, soda cáustica, sulfito de sodio y ácido clorhídrico.

A diferencia de la operación de empaque, donde los consumos principales estaban dados por cilindros neumáticos, en la operación de manufactura de hipoclorito los requerimientos de aire comprimido están dados en su mayor parte por bombas neumáticas utilizadas para diversos fines en el proceso. Se identificó un total de once bombas marca Wilden accionadas por este tipo de energía.

Las bombas Wilden son operadas por aire y son del tipo recíprocante de doble diafragma, con desplazamiento positivo. La bomba desplaza el fluido de una de sus dos cámaras de líquido hasta que se completa cada recorrido. En la Figura 3 puede apreciarse un corte transversal de este tipo de bombas donde se observa la ubicación de cada componente de la bomba.

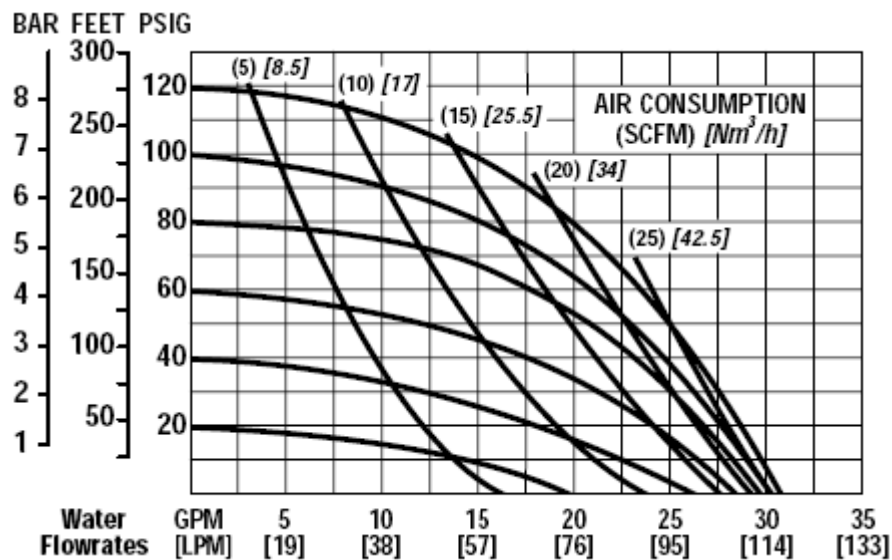
Figura 3
Corte transversal de una bomba Wilden accionada por aire



A la vez se realizó un análisis por área para determinar el consumo de aire de cada bomba, utilizando tanto el caudal que cada una debe entregar así como las curvas de rendimiento obtenidas del fabricante.

1) Área de lodos. En esta área se lleva a cabo principalmente la limpieza de los filtros utilizados para retener impurezas y partículas no deseadas en pasos posteriores del proceso. Para ello se utiliza una bomba modelo Wilden M2, cuya curva de rendimiento se puede observar en la Figura 4.

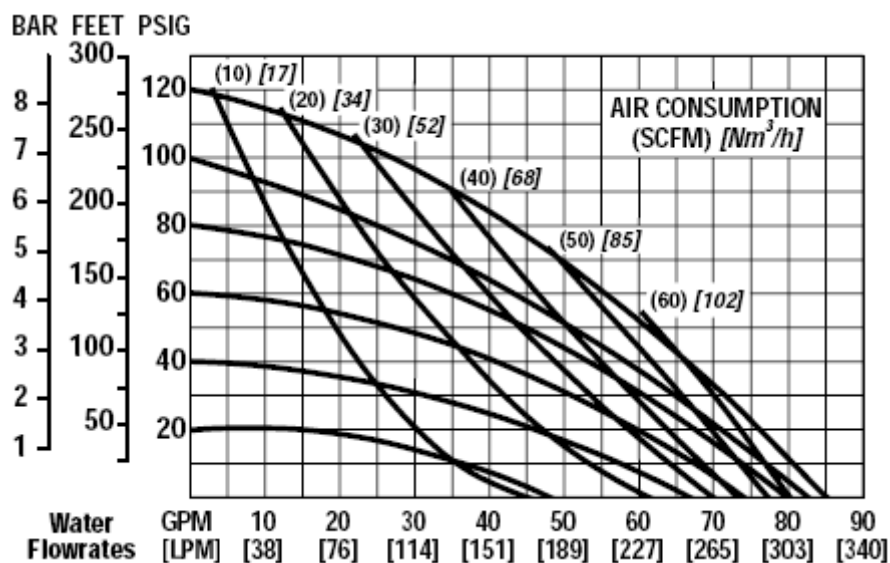
Figura 4
Curva de rendimiento de bomba Wilden M2.



Esta bomba requiere entregar un caudal de 18 gpm, a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar). Con esta información y la curva de rendimiento se determina que para operar en dichas condiciones, la bomba requiere una presión de 2.75 bar y un caudal de 9 scfm de aire comprimido.

2) Circulación de soda cáustica. La soda cáustica se utiliza para varios fines en el proceso, siendo tanto una materia prima, como una ayuda de trabajo en caso sea necesario realizar alguna neutralización en el dique. Para su bombeo y circulación desde el tanque de almacenamiento se tiene en uso una bomba Wilden M4. La curva de rendimiento de este modelo de bomba se observa a continuación en la Figura 5.

Figura 5
Curva de rendimiento de bomba Wilden M4



De acuerdo con el requerimiento de soda cáustica del sistema, esta bomba debe de entregar un caudal de 42 gpm, a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar). A partir de esta información y la curva de rendimiento presentada en la Figura 5, se determina que para operar en dichas condiciones, la bomba requiere una presión de 2.50 bar y un caudal de 15 scfm de aire comprimido.

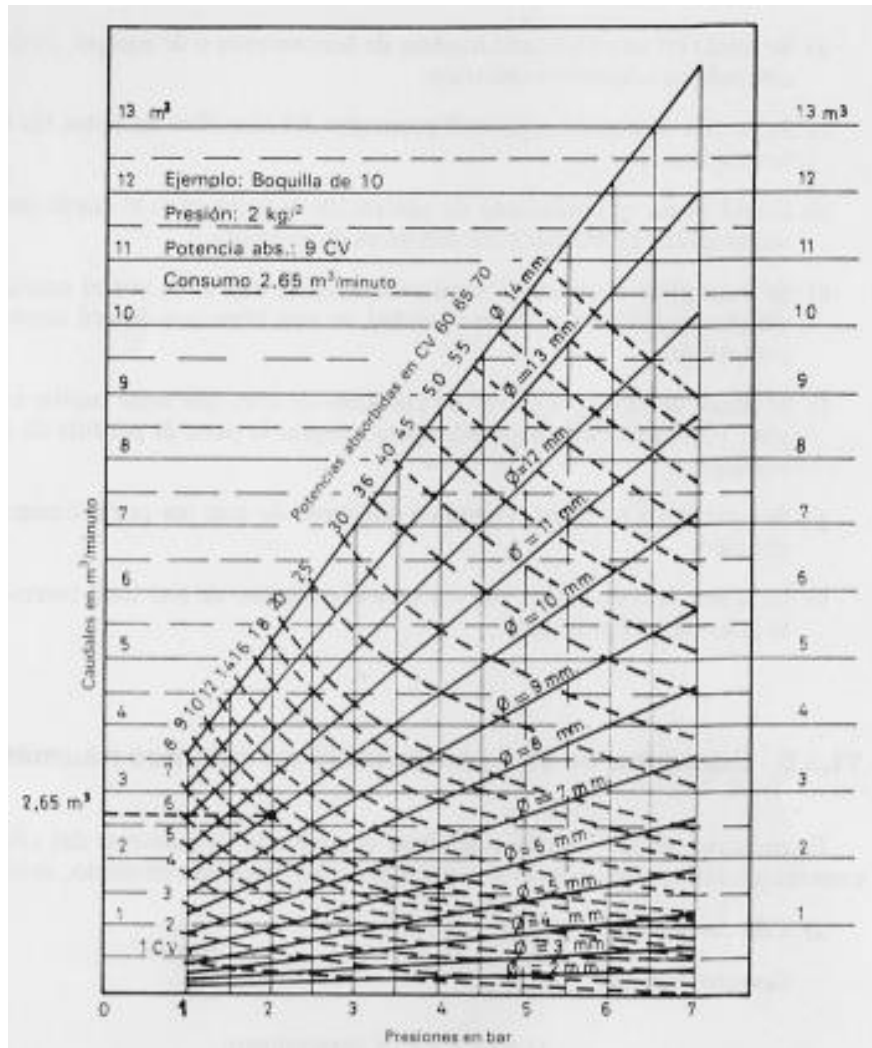
3) Tanque de carbonato de sodio. El carbonato de sodio se recibe en el área de manufactura de hipoclorito en sacos de 25 Kg. Estos sacos son cargados por el operador de turno para verterlos en un tanque donde se almacena y se hace la solución. El uso de este material supone dos puntos de consumo de aire comprimido. El primero es para lograr homogeneidad en la solución, burbujeando la mezcla para la utilización de la misma en la operación. Y el segundo punto es una bomba Wilden M2 utilizada para hacer circular la mezcla al resto de la operación.

Para el burbujeo del tanque se tiene una presión de descarga de 1 bar cuando la válvula está completamente abierta. Esta operación se lleva a cabo una vez al día con un tiempo de duración de 15 a 20 minutos. Para el cálculo de consumos en este tipo de aplicaciones que serían análogos a un soplador, se empleará la figura 6, extraída del texto Aire Comprimido de Carnicer Royo.

Para poder obtener un dato de consumo, debe de conocerse el diámetro de la boquilla u orificio, así como la presión de operación. En este caso ya se conoce la presión que es de 1

bar, y lo que se tiene es una tubería con agujeros que atraviesa el tanque en su base, a lo largo de todo el diámetro que es de 1 metro. Los agujeros tienen un diámetro de 3 mm, con una distancia de 10 cm de centro a centro, para un total de 8 agujeros.

Figura 6
Caudal de las boquillas de soplado



Con base a los datos anteriores y el uso de la Figura 6, se tiene que cada agujero representa un consumo de 8.83 scfm, para un total de 70.8 scfm si se toman en cuenta todos los orificios de la tubería.

Para el segundo punto de consumo en el tanque de carbonato de sodio, se tiene una bomba Wilden M2. El análisis de consumo es el mismo que se realizó previamente, tomando la lectura de la curva de rendimiento de esta bomba, mostrada en la Figura 4. El caudal que se requiere suministrar con esta bomba es de 15 gpm, a una presión de descarga de 20 psig (1.4

bar), por lo que el requerimiento de aire resulta en 7.5 scfm a una presión de operación de 2.41 bar.

4) Tanque de ácido clorhídrico. El tanque de ácido clorhídrico se encuentra ubicado en un área de la operación techada y rodeada de un muro de 1 metro de altura que forma un dique de contención. Esto se debe a que el ácido clorhídrico es un químico clase 1, de alta peligrosidad, y para el cual deben de tomarse precauciones muy estrictas tanto en la descarga como en su utilización en el proceso.

Los consumos de aire comprimido relacionados con este material son básicamente tres. El primero se da en el proceso de descarga, para el cual se emplea una bomba Wilden M4. Existe un área específica de descarga de químicos donde se realiza la operación. Esta bomba debe operar a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar) y debe de entregar un caudal de 30 gpm. Utilizando la Figura 5 que detalla la curva de rendimiento de una bomba Wilden M4, tenemos que la misma demanda 10 scfm a una presión de 1.86 bar.

Muchas veces se tienen fuertes lluvias y el agua tiende a ingresar dique. Para bombear el agua que se acumula y evitar inundación en esta área, se tiene designada una bomba Wilden M2. La presión de descarga debe de ser de nuevo 20 psig (1.4 bar) y el caudal a retirar el área es de 10 gpm. Con base a la curva de rendimiento de la bomba, tenemos que la misma requiere una presión de aire de 1.52 bar y 3 scfm de consumo.

Y por último se utiliza aire para operar la bomba que impulsa el ácido a la operación para su utilización. Esta bomba es una Wilden M4, cuya presión de descarga debe ser de 20 psig (1.4 bar) y el caudal que debe suministrar asciende a 25 gpm. Con esta información se tiene que la demanda de aire para asegurar la operación de la bomba en las condiciones mencionadas es de 5 scfm a una presión de 1.52 bar.

5) Tanque de sulfito de sodio. La utilización de este material es muy similar a la de carbonato de sodio. Se utiliza en cantidades menores, sin embargo el manejo implica también consumo de aire para burbujeo en el tanque, y bombeo de la solución para su consumo. En lo que respecta al burbujeo en el tanque, se tiene que el diámetro del mismo es de 80 cm. El burbujeo se hace a través de una tubería con orificios, misma que atraviesa el tanque en la base a lo largo de todo el diámetro. Los orificios tienen un diámetro de 3 mm, y los separa una distancia de 8 cm de centro a centro, para un total de 6 agujeros.

Con base a la Figura 6 tenemos que para una presión de operación de 1 bar, el consumo de aire por cada orificio es de 8.83 scfm, para un total de 52.98 scfm.

Para realizar el bombeo de la solución se utiliza una bomba Wilden M2, que opera a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar) y debe suministrar un caudal de 17 gpm. Para ello requiere un caudal de aire comprimido de 8 scfm a una presión de 2.8 bar.

6) Área de salmuera. El proceso de manufactura de hipoclorito da inicio en un tanque cúbico construido a base de cemento en el cual se vierte agua, grandes cantidades de sal, y anolita, que es una solución de sal degradada la cual se recicla y se añade en caliente, lo cual favorecer la reacción.

Estos materiales son agitados para entregar una mezcla llamada salmuera, la cual es luego pasada a través de diversos puntos en el proceso antes de ser transformada en hipoclorito de sodio.

El bombeo de la salmuera es realizado por dos Wilden M4, cada una operando a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar) y 42 gpm. Utilizando la curva de rendimiento tenemos que cada bomba requiere 15 scfm y una presión de aire comprimido de 2.41 bar, para un total de 30 scfm.

A la vez, el proceso requiere un caudal de anolita de 64 gpm, para lo cual se tienen dos bombas Wilden M4, cada una entregando un caudal de 32 gpm y una presión de descarga de 20 psig o 1.4 bar. Para ello, cada una requiere una presión de aire comprimido de 1.52 bar, y un consumo de 11 scfm, resultando en un total de 22 scfm.

En la tabla 11 se tiene un resumen de las bombas accionadas por aire comprimido que se ubican en el área de manufactura de hipoclorito de sodio.

Como resultado del análisis, se tiene que el consumo total por bombas asciende a 109.5 scfm.

Tabla 11
Requerimientos de aire comprimido en bombas del área de hipoclorito de sodio

Bomba	Material	Tarea	Marca/ modelo	Caudal a bombear (gpm)	Presión de descarga (bar)	Caudal de aire (scfm)	Presión de aire (bar)
1	Lodos	Limpieza filtros	Wilden M2	18	1.4	9	2.75
2	Soda Cáustica	Circulación	Wilden M4	40	1.4	15	2.50
3	Carbonato de sodio	Circulación	Wilden M2	15	1.4	7.5	2.41
4	Ácido Clorhídrico	Descarga	Wilden M4	30	1.4	10	1.86
5	Ácido Clorhídrico	Vaciado dique	Wilden M2	10	1.4	3	1.52
6	Ácido Clorhídrico	Circulación	Wilden M4	25	1.4	5	1.52
7	Sulfito de sodio	Circulación	Wilden M2	17	1.4	8	2.80
8	Salmuera	Circulación	Wilden M4	42	1.4	15	2.62
9	Salmuera	Circulación	Wilden M4	42	1.4	15	2.62
10	Anolita	Mezcla salmuera	Wilden M4	32	1.4	11	1.52
11	Anolita	Mezcla salmuera	Wilden M4	32	1.4	11	1.52

Los consumos de aire por burbujeo en tanques son considerablemente más altos que los de una bomba recíproca. Los mismos pueden observarse en la Tabla 12.

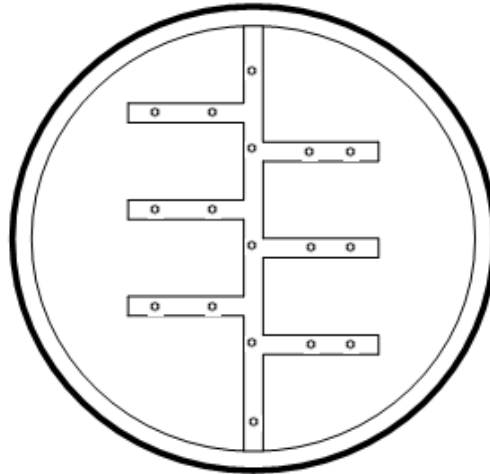
Tabla 12
Consumos de aire comprimido por burbujeo en tanques en el área de hipoclorito

Tanque	Material	Caudal de aire (scfm)	Presión de operación (bar)
1	Carbonato de sodio	70.80	1
2	Sulfito de sodio	52.98	1

b. **Manufactura de cloro.** El siguiente paso en el proceso, luego de la producción de hipoclorito, es la manufactura del cloro que finalmente se empaquetará. La misma no es una producción en línea, sino por batch de 20 toneladas métricas cada uno. Para ello se utilizan como materias primas hipoclorito de sodio, soda cáustica, carbonato de sodio y agua. Se tienen en uso dos tanques de 22,000 litros, con una altura de 3.05 metros, un diámetro de 3.60 metros.

1) **Burbujeo en tanques batch.** Debido a que la producción es por batch, las materias primas se mezclan por burbujeo en los tanques. La capacidad de producción es de 120 toneladas de cloro cada 12 horas, y los tanques se alternan para la preparación de cada batch, por lo que en cada tanque se prepara un total de tres batch en un periodo de 12 horas y el proceso de burbujeo que toma alrededor de 20 minutos por batch, no se lleva a cabo al mismo tiempo en los dos tanques. Cada tanque tiene en su base un sistema de tuberías con orificios para llevar a cabo el burbujeo. La estructura de la tubería en la base del tanque se puede apreciar en la Figura 7.

Figura 7
Estructura de la tubería de soplado en la base de los tanques de manufactura de cloro



La presión de operación en el burbujeo es de 1 bar, y el diámetro de los 17 orificios es de 3 mm. Para el cálculo de los requerimientos de aire en el burbujeo de estos tanques se utiliza de nuevo la Figura 6. Con la información de la presión y diámetro de los agujeros, se tiene que cada uno representa un consumo de aire de 8.83 cfm, para un total de 150.11 cfm.

2) Tanques de lodos. Se tiene también en el área dos tanques de lodos para limpieza de los filtros. En estos tanques se realiza un burbujeo también, y cada uno cuenta con un sistema similar al mostrado en la Figura 7, excepto que no tiene las flautas transversales, sino únicamente una tubería que atraviesa el tanque a lo largo de todo el diámetro. Estos tanques tienen un diámetro de 75 cm, una altura de 1.25 metros y el burbujeo se da en ambos al mismo tiempo. La tubería tiene un total de 4 agujeros de 2 mm cada uno, y se tiene una presión de descarga de 1 bar. De acuerdo con la Figura 6, el consumo por cada agujero es de 3.53 scfm, lo cual suma para un tanque 14.12 scfm y 28.24 scfm para ambos.

3) Bombeo para filtración. Se utiliza una bomba Wilden M2 para esta tarea, misma que impulsa un caudal de 16 gpm a una presión de descarga de 20 psig (1.4 bar). De acuerdo a la curva de rendimiento el consumo en este punto es de 6 scfm a una presión de 2.61 bar.

B. Compresores instalados

El sistema actual cuenta con tres compresores de tornillo, mismos que se encuentran en un área exterior a la operación, en un ambiente ventilado y techado. Actualmente, dos de ellos tienen una operación continua, mientras que uno de ellos funciona como back up en el momento que alguno llegue a tener problemas o se requiera hacer un mantenimiento y la

producción deba de seguir. A continuación se detallan las especificaciones de cada uno de ellos.

1. Compresor principal. El compresor principal es un Atlas Copco de tornillo, de una sola etapa, tipo GA75, serie AII460633. Tiene una potencia de 100 hp, cuando el motor está operando a una velocidad de 3,600 rpm. Su capacidad máxima de entrega de caudal es de 426 scfm, operando a una presión de 8.62 bar y con una presión de descarga máxima de 9.10 bar.

De momento este compresor es el encargado de soportar la mayor parte de la operación, entregando aire comprimido para toda la operación de manufactura (hipoclorito de sodio y cloro) así como para las líneas de empaque de bolsas de 210 ml, 260 ml y la línea de botellas.

2. Compresor secundario. El segundo compresor es un Ingersoll-Rand, modelo SSR-EP50SE, serie G7834U99197, también de tornillo y una sola etapa de compresión. Cuenta con una capacidad máxima de 194 scfm, entregando una potencia de 50 hp. Opera con un voltaje de 480 V y un amperaje de 73 A. Tiene una presión de operación de 8.62 bar y una presión de descarga de 8.83 bar.

Actualmente se tiene este compresor completamente dedicado a la línea de soplado de envases, y no se utiliza para ningún otro propósito.

3. Compresor back up. La planta cuenta con un tercer compresor marca Ingersoll-Rand modelo SSR-EP50SE, serie G9166U01058 también de tornillo y una etapa de compresión. Tiene una presión de operación de 8.62 bar, una potencia de 50 hp, una presión de descarga de 8.83 bar y una capacidad máxima de 215 scfm. Opera con un voltaje de 480 V y un amperaje de 73 A.

Este compresor se utiliza en pocas ocasiones, ya sea cuando el equipo principal tiene un mantenimiento planeado o como plan de contingencia cuando ocurre alguna falla.

C. Depósitos instalados

El sistema actual cuenta con tres depósitos de aire, dos de los cuales se encuentran en el área de compresores y uno que se encuentra en el área de manufactura de hipoclorito. Se hará una breve descripción de las características de cada uno a continuación.

1. Depósito de compresor principal. Este depósito, marca Sateña y serie 6771 tiene una altura de 2.46 metros y un diámetro de 0.92 metros, con una capacidad de 1,700 litros. Está instalado a continuación de un secador que recibe directamente el aire del compresor. La presión máxima de operación es de 8.62 bar.

2. Depósito de compresor secundario. El segundo depósito de aire es de marca Premix, serie AIR-MIX, con una capacidad de 1,000 litros. Tiene una presión de operación de 8.62 bar y una presión de diseño de 10.69 bar. El mismo está instalado a la salida del compresor secundario de 50 hp.

3. Depósito del área de hipoclorito. Es el depósito más grande de toda la planta. De marca Premix, serie MIX-443, tiene una capacidad de 4,160 Litros. Su presión de operación es de 8.71 bar, y la presión de diseño es de 10.78 bar. Una tubería que atraviesa toda la nave de empaque y manufactura realiza la conexión desde el depósito del compresor principal hasta éste.

D. Secadores instalados

Para el tratamiento del aire se tienen instalados tres secadores, uno por cada compresor y mismos que se encuentran en dicha área. La importancia de estos equipos radica en el hecho de que el aire suministrado a la operación debe ser de muy alta calidad, sin vapor de agua y sin partículas contaminantes.

1. Secador para compresor principal. Este equipo marca Atlas Copco, tipo F0300, serie 1275040 tiene una presión máxima de operación de 20 bar, una temperatura máxima de 60° C. El mismo opera con un voltaje de 480 V y un amperaje de 9.5 A.

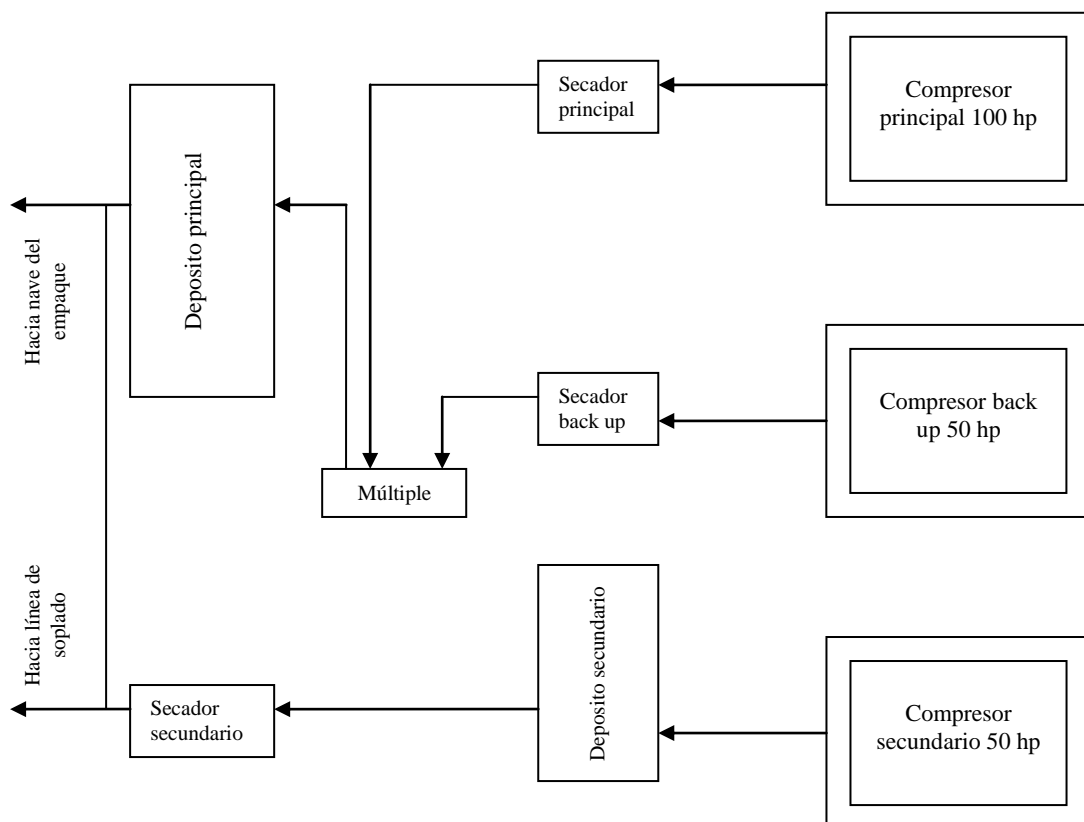
2. Secador para compresor secundario. Este secador es de marca Ingersoll-Rand, modelo DXR200, serie 99LDXR3276. Puede operar a una presión máxima de 17 bar. Respecto a la alimentación, opera a 230 V y 14 A.

3. Secador para compresor back up. Este último es también marca Ingersoll-Rand, modelo TS200, serie DR10010895-022601. Es un secador enfriado por aire con una presión máxima de operación de 12 bar y tiene una temperatura máxima de admisión de aire de 50°C.

E. Red de distribución. La red de tubería de distribución de aire comprimido es bastante grande y compleja debido a todos los puntos de consumo que se tienen y a que prácticamente todas las áreas cuentan con equipos que requieren aire comprimido para su operación.

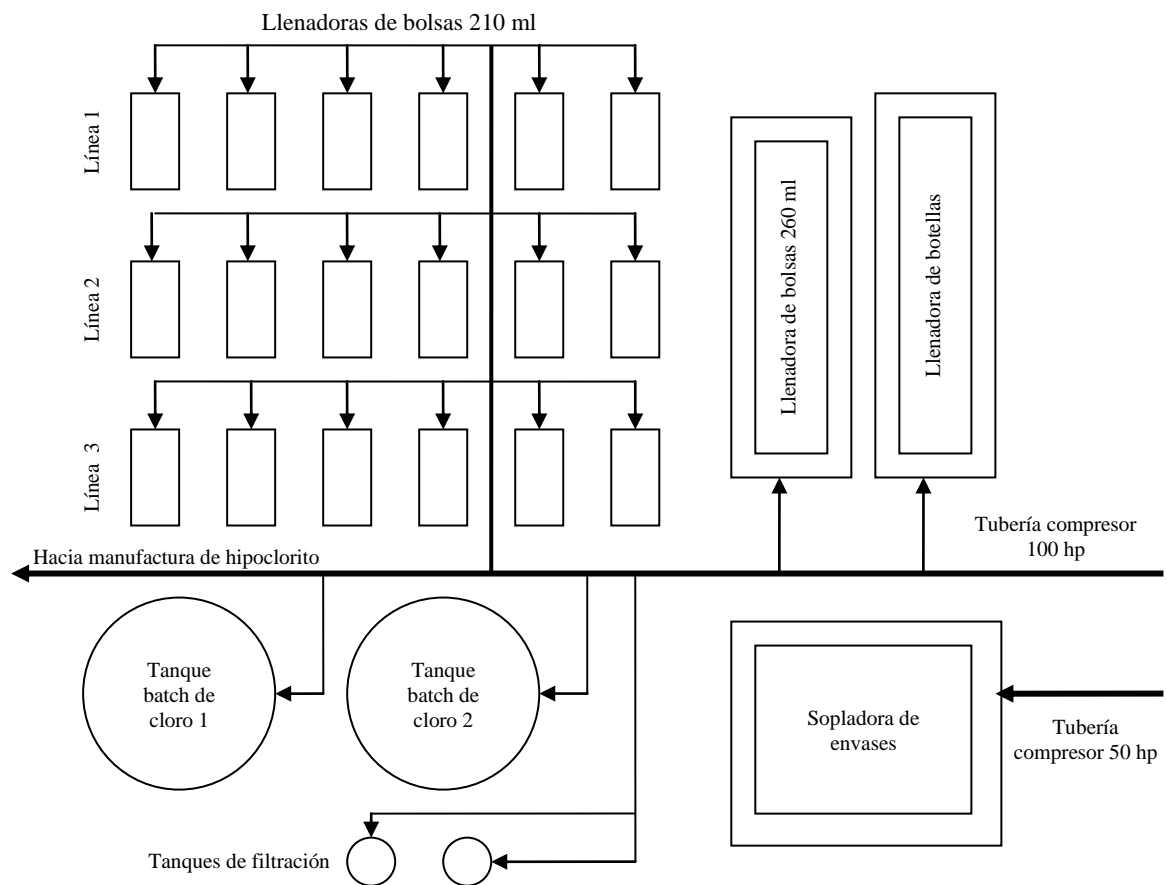
Debido a que no existe actualmente un plano de distribución de aire para la planta que contemple todos los consumos, longitud de tuberías y diámetros, el trabajo que se hizo fue de rastrear toda la tubería de la planta e ir midiendo línea por línea las longitudes, identificando los accesorios en cada una. El proceso arrancó en el área de compresores. En la Figura 8 puede apreciarse un diagrama de flujo donde se resume cómo están organizados los mismos.

Figura 8
Disposición de compresores, depósitos y secadores



En la Figura 9 se tiene un diagrama con el flujo de aire en la nave de del empaque, donde se encuentran las llenadoras de bolsas de 210 ml, la llenadora de bolsas de 260 ml, la línea de botellas, la línea de soplado de envases y una parte del área de manufactura de cloro. En la misma puede observarse cómo la tubería principal atraviesa la operación, y las tuberías secundarias que se encargan de la distribución del aire a los puntos de consumo.

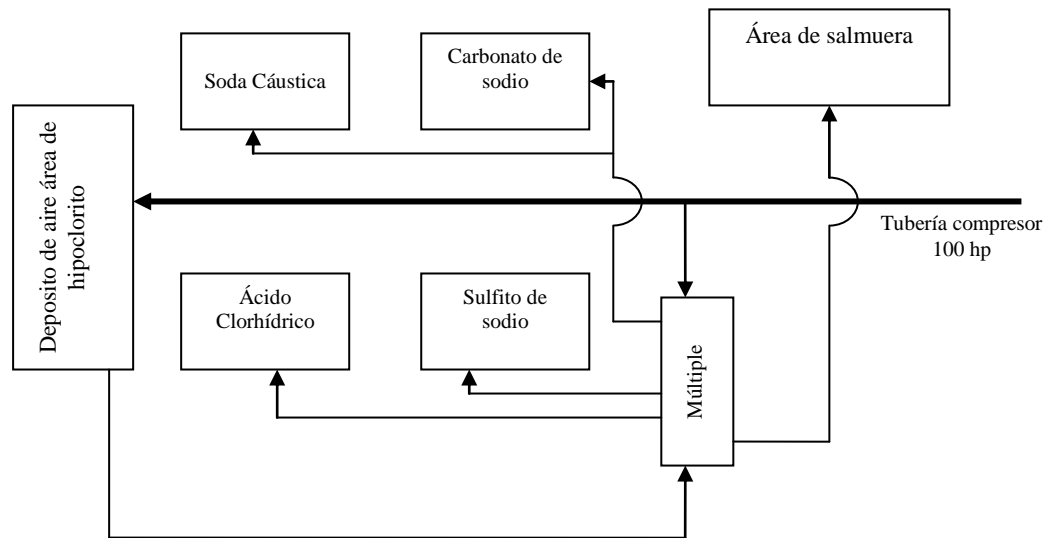
Figura 9
Diagrama de flujo de aire comprimido en la nave del empaque



La tubería principal que atraviesa el área tiene un diámetro de 2", y las tuberías secundarias varían entre $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ". Como puede observarse, el compresor secundario de 50 hp está dedicado a la línea de soplado de envases, mientras que el compresor principal de 100 hp suministra el resto de la operación en la nave del empaque, así como en el área de manufactura de hipoclorito como puede observarse en la Figura 10. En caso se diera la necesidad de utilizar el compresor back up, la tubería que seguiría sería la principal, misma que utiliza el compresor de 100 hp.

Figura 10

Diagrama de flujo de aire comprimido en área de manufactura de hipoclorito



Como se comentó anteriormente, puede observarse que la tubería principal que proviene del compresor de 100 hp. La misma tiene dos conexiones en el área de hipoclorito, una que va directamente al depósito de aire del área, y otra que va al múltiple que distribuye el aire hacia el resto de los equipos.

La cuantificación de pérdidas por tuberías y accesorios en la red de distribución es una parte importante para determinar si la misma es eficiente o si el diseño de ésta representa un problema en términos de capacidad no aprovechada del compresor. Dicho análisis se trabajó en base al estudio de campo que se realizó en cada área, sin embargo se expondrá en un capítulo adelante.

IV. PRINCIPALES PÉRDIDAS DEL SISTEMA ACTUAL DE AIRE COMPRIMIDO

El trabajo a detalle que se realizó con el análisis por área y por punto de consumo de aire fue de gran importancia para cuestionar el estado actual del sistema, y de esa manera encontrar los principales problemas que se tienen y que están afectando directamente tanto la operación como los costos de la empresa. Se encontraron diversas áreas de oportunidad en el diseño y operación del sistema, sin embargo en ocasiones es más costoso y complicado realizar modificaciones muy grandes a las instalaciones actuales. Es importante mencionar que la planta en estudio tiene un enfoque muy claro en las soluciones de bajo costo y la eliminación de pérdidas, llegando incluso a nivel cultural en todos los empleados. Con esto en mente y priorizando los recursos para ser realmente efectivos, se eligieron las principales pérdidas y se propondrán soluciones a las mismas.

A. Condensado en las líneas de producción

1. Problema generalizado. El problema de condensado en los equipos neumáticos y tuberías de distribución es generalizado para las instalaciones de aire comprimido. El agua proviene del hecho de que el aire comprimido a presiones de 4 a 8 bares no es capaz de contener todo el vapor de agua que absorbe de manera fácil cuando está a presión atmosférica. La aptitud del aire para retener agua en forma de vapor está relacionada como se mencionó con anterioridad con la temperatura y la presión.

Los daños que ocasiona este tipo de problema son fallas en los elementos neumáticos, desgaste y oxidación de tuberías y paros de operación por drenado de líneas.

2. Condiciones atmosféricas. En el caso de la planta en estudio, se tiene que la misma se encuentra en Escuintla, área donde el clima es bastante cálido. Según datos del Insivumeh, la presión atmosférica en dicho lugar asciende a 1.023 bar y la temperatura promedio es de 27° C. La humedad relativa del aire es bastante alta y promedia un 80% según la misma fuente. Debido a las altas temperaturas, el aire atmosférico tiene más capacidad de almacenar vapor de agua, haciendo más complicado el trabajo de eliminarla.

3. Impacto para la planta. De acuerdo con las entrevistas realizadas con los equipos de operación de la planta, se recibió información de los problemas que este defecto ha

ocasionado, con lo cual fue más fácil entender la gravedad del problema. Básicamente el impacto principal está en el área del empaque, ya que es ahí donde se han dañado la mayor cantidad de equipos neumáticos y se ha tenido problemas en la tubería.

Dentro de las implicaciones están los paros no programados principalmente en las líneas de empaque de bolsas de 210 ml. En estas líneas se produce el 75% del volumen de venta de la planta, por lo que prácticamente el recurso está operando 24 horas al día, y un paro tiene un costo estimado de \$1,350 por hora en el tiempo muerto en que no se están entregando cajas de producto terminado. Los paros se dan alrededor de una vez por quincena y tienen una duración aproximada de 45 minutos mientras los operadores realizan el drenado de líneas para poder continuar operando de manera normal. Esto representa un costo mensual de \$2,025 por concepto de paros.

Otro recurso en el que se tiene problemas es en la línea de soplado de envases. Como se explicó brevemente, el uso principal del aire en esta operación es a través de los pines de soplado para dar forma al envase utilizando moldes de aluminio que tienen un alto costo. Los pines son de acero inoxidable para evitar la corrosión por la humedad que aún lleva el aire. El problema se vuelve crítico si esta humedad llega a los moldes, ya que la corrosión que podría tenerse en el molde es tan grande que fácilmente lo dañaría permanentemente.

B. Capacidad sobrada en compresores

1. **Análisis de utilización.** En el capítulo anterior se hizo un análisis de los consumos de aire comprimido por área. El mismo es un cálculo del consumo equivalente a que los equipos neumáticos operen el 100% del tiempo, lo cual no es real. Para ajustar estos consumos de acuerdo con los tiempos reales que los equipos operan se utiliza el coeficiente de utilización, siguiendo la metodología de análisis planteada en el texto de Aire Comprimido de Carnicer Royo. El mismo consiste en un valor porcentual que equivale a cuánto tiempo en realidad está trabajando el equipo lo que a su vez se traduce en los requerimientos reales de aire comprimido.

En la Tabla 13 se resumen los consumos de aire comprimido de toda la operación, tanto los que están demandando energía neumática del compresor principal de 100 hp y del compresor secundario de 50 hp. Los mismos incluyen el coeficiente de utilización de cada elemento, basado en el tiempo de operación. Esto con la idea de demostrar que la capacidad instalada de generación de aire comprimido está sobrada, lo cual está representando una pérdida grande en consumo de energía eléctrica para la planta.

Tabla 13
Resumen de consumos de aire comprimido total planta. Ajustados a tiempo de utilización

Area	Equipo	Función	Cantidad	Consumo específico (scfm)	Consumo total (scfm)	Tiempo de operación	Coefficiente utilización (%)	Consumo real (scfm)
Empaque 210 ml	Cilindro neumático	Llenado de tanque	18	0.039	0.699	6.2 días/sem	89%	0.624
Empaque 210 ml	Cilindro neumático	Dosificación	18	0.759	13.669	6.2 días/sem	89%	12.205
Empaque 210 ml	Cilindro neumático	Sello vertical	18	0.243	4.373	6.2 días/sem	89%	3.905
Empaque 210 ml	Cilindro neumático	Sello horizontal	18	1.621	29.170	6.2 días/sem	89%	26.044
Empaque 210 ml	Cilindro neumático	Codificado	18	0.243	4.373	6.2 días/sem	89%	3.905
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Dosificación	1	0.570	0.570	5 días/sem	71%	0.407
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Dosificación	1	0.570	0.570	5 días/sem	71%	0.407
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Dosificación	1	0.570	0.570	5 días/sem	71%	0.407
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Dosificación	1	0.570	0.570	5 días/sem	71%	0.407
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Material empaque	1	2.279	2.279	5 días/sem	71%	1.628
Empaque 260 ml	Cilindro neumático	Cortahilos	1	0.068	0.068	5 días/sem	71%	0.049
Soplado envase	Pines de soplado	Soplado	2	60.177	120.354	20 seg/min	31%	37.252
Soplado envase	Cilindro neumático	Movimiento corte	2	1.078	2.156	6.5 días/sem	93%	2.002
Soplado envase	Cilindro neumático	Sujeción envase	2	1.189	2.377	6.5 días/sem	93%	2.208
Soplado envase	Cilindro neumático	Sensor presión	2	4.136	8.272	6.5 días/sem	93%	7.681
Soplado envase	Cilindro neumático	Corte rebaba	4	16.188	64.754	6.5 días/sem	93%	60.128
Empaque botella	Válvula neumática	Llenado de botellas	10	1.500	15.000	40 seg/min	43%	6.429
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Limpieza filtros	1	9.000	9.000	4 horas/día	17%	1.500
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Circulación	1	15.000	15.000	22 horas/día	92%	13.750
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Circulación	1	7.500	7.500	22 horas/día	92%	6.875
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Descarga	1	10.000	10.000	12 horas/sem	7%	0.714
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Vaciado dique	1	3.000	3.000	2 horas/día	8%	0.250
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Circulación	1	5.000	5.000	22 horas/día	92%	4.583
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Circulación	1	8.000	8.000	22 horas/día	92%	7.333
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Circulación	2	15.000	30.000	23 horas/día	96%	28.750
Manuf Hipoclorito	Bomba reciproc	Mezcla salmuera	2	11.000	22.000	23 horas/día	96%	21.083
Manuf Hipoclorito	Boquillas soplado	Burbujeo carbonato	1	70.800	70.800	5 horas/día	21%	14.750
Manuf Hipoclorito	Boquillas soplado	Burbujeo sulfito	1	52.980	52.980	6 horas/día	25%	13.245
Manuf Cloro	Boquillas soplado	Burbujeo batch	2	150.000	300.000	5 horas/día	21%	62.500
Manuf Cloro	Boquillas soplado	Burbujeo lodos	2	14.120	28.240	4 horas/día	17%	4.707
Manuf Cloro	Bomba reciproc	Filtración	1	6.000	6.000	23.5 horas/día	98%	5.875
							Total scfm	351.604

2. Comparación con la capacidad instalada. Como puede observarse en la tabla anterior, los consumos estudiados para la planta tanto en el área de empaque como de manufactura ascienden a 351.604 scfm, ya ajustados a tiempos de operación por cada equipo. Es importante mencionar que para los recursos de producción se está tomando el consumo máximo. Por ejemplo para el área de empaque de bolsas de 210 ml, se está considerando la operación de las 18 máquinas; para la línea de soplado de envases se tomó el consumo de aire comprimido cuando se está produciendo envase galón que es cuando más aire se requiere.

La literatura aconseja al respecto añadir a este número total de consumos un 10% adicional por fugas y un porcentaje adicional previendo futuras ampliaciones, que en este caso se estimará en 15%. Si consideramos estos requerimientos adicionales tenemos un total de 439.5 scfm. El compresor principal tiene una capacidad máxima de 426 scfm a una presión de operación de 8 bar, lo cual nos deja muy cerca del caudal máximo que puede suministrar.

De momento se tiene en operación tanto el compresor principal como el secundario. Si tomamos la suma de los consumos actuales que suministra el compresor principal, lo cual significa únicamente eliminar del cálculo anterior los consumos relacionados con soplado de envase, tenemos un total de 302.92 scfm. Este número ya incluye el 25% adicional. Para el compresor secundario se tiene actualmente un total de 136.6 scfm de consumo ya incluyendo el 25% adicional. La capacidad instalada del compresor secundario es de 194 scfm, por lo que también vemos que existe una diferencia que está causando pérdidas por concepto de consumo de energía eléctrica.

En el siguiente capítulo se planteará una solución para optimizar el consumo de energía eléctrica distribuyendo los consumos de aire comprimido de la mejor manera.

C. Demanda para burbujeo de tanques

1. **Requerimientos de caudal y presión.** Esta pérdida va relacionada con el uso de la capacidad de compresores. Luego del análisis a detalle de los consumos por área, y de entrevista con el encargado del sistema de compresores en la planta, surgieron varios puntos de interés respecto a los requerimientos más altos que se tienen en operación,

Se pudo observar que en lo que a consumo se refiere, los puntos más altos son los que se relacionan con burbujeo en tanques para realizar la mezcla de materias primas, y donde la presión de descarga que se requiere no es tan elevada con la requerida en actuadores neumáticos y bombas reciprocantes. Este caso se tiene tanto en los tanques batch de preparación de cloro en los cuales se tiene un consumo de 150 scfm por cada uno a una presión de descarga de 1 bar, así como en los tanques de burbujeo de sulfito de sodio y carbonato de sodio, donde los consumos ascienden a 53 y 70 scfm respectivamente con una presión de descarga de 1 bar.

2. **Impacto en la operación.** El problema radica en que los compresores son máquinas diseñadas principalmente para elevar la presión del fluido, en este caso aire, para realizar luego algún trabajo. El caudal entregado irá en función de la potencia que entregue el

compresor también, sin embargo para aplicaciones con altos consumos de aire y bajas presiones se recomienda el uso de sopladores, ya que están diseñados para entregar un alto caudal a bajas presiones.

El impacto que se ha tenido en la operación por estos requerimientos pico es que se han tenido la siguiente cantidad de paros por mes debido a que cuando se realiza la operación de burbujeo y los requerimientos de aire son altos, se dispara el compresor.

Tabla 14
Pérdidas por fallas en compresor debido a requerimientos pico en el sistema

Mes	Paros	Tiempo total	Pérdida
Junio 2006	2	6.5	\$8,775
Julio 2006	4	4.6	\$6,210
Agosto 2006	1	3.2	\$4,320
Septiembre 2006	6	8	\$10,800
Octubre 2006	0	0	\$0
Noviembre 2006	1	1.8	\$1,350
Diciembre 2006	2	1.2	\$2,700

Como puede observarse las pérdidas por no entregar producto terminado y por tiempo muerto de las operaciones son muy elevadas. Es por ello que es necesario determinar alguna forma de eliminar esta fuente de pérdidas para la planta. En el siguiente capítulo se propondrá una solución al problema.

D. Caída de presión en tuberías y accesorios

La caída de presión en las tuberías y accesorios es una pérdida común en muchas instalaciones ya que en esta parte se pierde presión lo que se traduce en pérdida de potencia y finalmente en consumo extra de energía eléctrica. Se realizó un mapeo de las tuberías y accesorios a detalle de cada área para verificar que las pérdidas de presión asociadas al diseño de la red de distribución actual no sobrepasan, los niveles deseados en una red eficiente.

Sin embargo, como se comentó antes, las pérdidas que se identificaron debieron de priorizarse en base a los ahorros que representaría el corregir los defectos encontrados en el sistema. Las pérdidas más importantes son las que se han mencionado en los tres incisos anteriores, ya que su relación con el costo y confiabilidad de la operación es mayor. El análisis de la tubería realizado demostró que los cambios de diseño que requiere la operación

representan costos demasiado elevados si se comparan con el beneficio o ahorros que entregarían a la operación. Es importante mencionar que una vez se tengan solucionados los problemas más significativos, es más factible llegar al siguiente nivel de detalle para eliminar pérdidas más pequeñas buscando siempre soluciones de bajo costo para la planta.

V. PROPUESTA DE MEJORA Y BENEFICIOS DE ELIMINAR LAS PÉRDIDAS IDENTIFICADAS

A. Condensado en las líneas de producción

1. Causa raíz del problema. Se realizó un análisis de las posibles causas del problema de condensado en las líneas de producción. Las razones por las cuales se puede dar este problema son diversas como ya se estudió en la parte teórica de este trabajo, donde se hizo énfasis en las variables que tienen principal influencia en el comportamiento y manejo del aire.

Como se mencionó anteriormente, las condiciones de entrada del aire atmosférico no son las óptimas debido a que las altas temperaturas ocasionan que el aire tenga una capacidad mayor de almacenar vapor de agua cuando está a presión atmosférica. A esto se suma el hecho de que el trabajo realizado por el compresor sobre el aire para reducir el volumen y aumentar la presión genera un incremento de temperatura en el fluido. El mismo es significativo y deben tenerse formas para asegurarse que esto no tenga repercusiones en la red.

El compresor principal de 100 hp cuenta con un sistema interno de enfriamiento por aire. La temperatura a la que debe de llegar el aire al depósito está entre 25 y 30° C. Con esto en mente se midió la temperatura a la salida del compresor y a la salida del secador, siendo las mismas de 40° C y 39° C respectivamente. Estas temperaturas son demasiado elevadas para la cantidad de vapor de agua que contiene el aire atmosférico. Si bien el depósito tiene un sistema de purga de condensado y existe una trampa de vapor entre el depósito y el secador, no toda el agua será eliminada en esa parte si la temperatura es tan alta.

2. Propuesta de solución. Evidentemente el problema está en un sistema de reducción de la temperatura. El radiador incorporado del compresor no logra reducir la temperatura del aire como se requiere. Se hizo una revisión y el mismo se cambió hace cuatro meses, y está operando de manera normal. La propuesta consiste en agregar al sistema un refrigerador posterior que utilice agua como medio de enfriamiento. Esto no representa un costo adicional para la empresa debido a que se cuenta con un pozo en la planta.

Este tipo de equipos logra reducir entre 50 y 80% de la humedad aspirada por el compresor. El agua se encuentra a una temperatura promedio de 21° C. Si se adquiere un refrigerador posterior de buen rendimiento, el diferencial entre la temperatura de salida del aire y la temperatura de entrada del agua debería de estar entre 7 y 10°C. Esto aseguraría que el aire comprimido llegue al depósito y secador a una temperatura no mayor de 31° C.

El refrigerador posterior se deberá de instalar a la salida del compresor principal. Si se tiene una temperatura de 40° C a la salida del mismo, y un caudal máximo de 426 scfm, se debe de instalar un refrigerador de 2.75 kW, de acuerdo con catálogos de diversos fabricantes. El costo del equipo completo asciende a \$3,780 más los gastos de instalación que aproximadamente serían de \$720 y gastos de tubería y acoplamientos de \$375, tenemos un total de \$4,875. A ello debemos de agregar el costo de la energía eléctrica, para lo cual se estima que el equipo estará en funcionamiento durante 29 días al mes. Con esto en mente el costo de la energía llegaría a ser de \$287 por mes, utilizando un precio de \$0.15 por kWh.

3. Beneficios del proyecto. Si se hace un análisis de valor presente neto, se tiene que necesitamos una inversión de \$4,875 en total para la instalación. Aunado a ello está el gasto de \$287 mensuales por energía eléctrica. Si se asume que con esta solución se va a eliminar un 70% de los paros por purga de agua de las líneas de producción, que tienen un impacto promedio de \$2,025 mensuales, tenemos reducción de costos de \$1,417 mensuales. Esto nos da un valor presente neto de \$8,702, utilizando una tasa de interés del 11% compuesta anualmente.

B. Capacidad sobrada en compresores

1. Causa raíz. El análisis de consumos a nivel planta dio como resultado que las capacidades del compresor principal están muy cerca de cubrir la totalidad de requerimientos de aire comprimido, trabajando a un 100%. No es recomendable tener un equipo trabajando así cuando se requiere que opere prácticamente sin parar.

Ahora bien es importante hacer la pregunta: ¿Qué impide que se suministre el total de requerimientos de aire con el compresor principal? Luego del análisis profundo se llegó a la conclusión que el problema son consumos de grandes cantidades de caudal a baja presión, y un compresor como se comentaba es una máquina destinada a elevar la presión de un fluido, no a entregar cantidades gigantescas del mismo. Estos consumos son los referentes principalmente al burbujeo de aire en los tanques batch del área de manufactura de cloro.

2. **Propuesta de solución.** La propuesta que se hace va de la mano con la solución de la tercera pérdida o defecto. La misma consiste en eliminar de la red de suministro de aire comprimido del compresor principal al sistema de burbujeo de tanques batch de cloro. Los mismos representan un consumo ajustado de 78.13 scfm incluyendo pérdidas y porcentaje adicional, lo cual permitiría liberar la capacidad del compresor principal. El resultado sería una demanda ajustada de 225 scfm para el compresor de 100 hp, lo que permitiría abrir el by pass que ya está instalado entre la salida del depósito principal y la salida del depósito secundario para alimentar a la operación de soplado con este compresor.

El compresor tendrá con la operación de soplado de envases una demanda total de 361 scfm, lo cual es perfectamente manejable con las capacidades de caudal que tiene. De esta manera se estaría utilizando un 85% de la capacidad del compresor.

3. **Beneficios del proyecto.** El beneficio principal se tendrá por ahorros de energía eléctrica. Lo que tendríamos es la liberación total del compresor de 50 hp, que operando en carga a 35kW un 62% del tiempo y en marcha a 26.25kW un 38% del tiempo (datos calculados con medición de amperaje experimental), representa un ahorro de \$3,300. Esto se calculó con base a una operación de 29 días al mes con las potencias mencionadas y \$0.15 por kWh.

El siguiente beneficio se obtiene al reducir la cantidad de paros por problemas de demanda pico que causan que el compresor se dispare. En promedio estos paros tienen un impacto de \$3,500, y asumiendo que con esto se elimina un 50% de los fallos, tendríamos un ahorro de \$1,750 mensuales. Es evidente que no se ha requerido hacer ninguna inversión en esta mejora, y también vale agregar que está relacionada con la primera pérdida expuesta relativa al condensado en las líneas. Esto se debe a que el condensado se vuelve crítico en la operación de soplado porque puede dañar permanentemente los moldes y el costo sería muy elevado. Al eliminar esta fuente de pérdida en el sistema, nos aseguramos que al conectar la máquina sopladora a la red de distribución del compresor principal, no corremos un riesgo tan grande como el de dañar otros componentes y que al final el proyecto resulte en más pérdida que ahorro.

Un proyecto de ahorro adicional podría consistir en instalar un variador de frecuencia para el motor eléctrico del compresor de 100 hp. Esto con la idea de ajustar la capacidad del compresor y por ende su consumo energético a la demanda real, dependiendo de las líneas que se tengan en operación de empaque y los requerimientos planeados para el área de manufactura.

C. Demanda para burbujeo de tanques

1. **Causa raíz.** La pérdida en sí está completamente relacionada con la anterior, mas involucra otra solución necesaria. El problema en este caso es la siguiente incógnita: ahora que se ha eliminado el burbujeo de los tanques batch de cloro del sistema de distribución de aire comprimido del compresor principal, ¿qué equipo lo alimentará?

2. **Propuesta de solución.** La solución en este caso consiste en instalar un soplador adecuado para surtir el caudal de aire que requiere la operación de burbujeo. Como se explicó, este equipo consume menos energía y a la vez es más apto para las necesidades específicas de la tarea. Se requiere un soplador con una presión descarga mínima de 0.5 bar y un caudal de 175 scfm.

Los requerimientos de los dos tanques son de 300 scfm. Sin embargo, los batch se preparan de manera alternativa, por lo que en ningún momento están ambos realizando el burbujeo. Por ello es suficiente un caudal de 175 scfm. Además se tomó en cuenta que actualmente se está descargando aire a través del compresor principal a una presión de 1 bar, lo cual es más de lo necesario. Esto se calculó con base a la densidad del fluido y la presión que debe de vencer el aire para lograr burbujear la mezcla. La presión de equilibrio se da en 0.3 bar, con una densidad del fluido de 1.095 Kg/Lt y una altura de fluido de 2.8 metros.

El costo de un soplador con estas capacidades asciende a \$2,735, más el costo del motor eléctrico de 5.2 kW que opera con un voltaje de 480 V, que es aproximadamente de \$930. A ello se debe agregar los costos de instalación que serían de \$600 y los costos por tubería y accesorios por \$390. Con ello tenemos un total de \$4,655 para la inversión. Si el soplador opera un total de 4 horas al día por 31 días al mes, se tiene un consumo de energía eléctrica mensual de \$580.

3. **Beneficios del proyecto.** Los beneficios de este proyecto se deben evaluar tomando en cuenta los costos de inversión y de energía eléctrica, así como los beneficios de no estar utilizando el compresor secundario. Para ello tenemos un Valor Presente Neto a un año del proyecto de \$45,921, usando una tasa de interés de 11% compuesta anualmente.

VI. CONCLUSIONES

- El conocimiento a detalle del funcionamiento y ubicación de todos los equipos que operan utilizando aire comprimido es de vital importancia para el estudio de una red de distribución y generación de aire comprimido.
- La reducción de costos a través de la eliminación de fallas en los sistemas de una planta es necesario para garantizar que una planta de producción será sostenible en el tiempo y a la vez confiable en su operación.
- La industria actual hace cada vez más necesario contar con el conocimiento necesario en cuanto a energía neumática debido a la creciente implementación de proyectos de automatización.
- El análisis de pérdidas involucra un proceso muy importante que debe aplicarse a todas las áreas y es el de identificar y priorizar para lograr enfocar los esfuerzos hacia objetivos alcanzables.
- En encarecimiento de la energía eléctrica hace cada vez más necesario el tipo de análisis que se empleó en el presente trabajo para encontrar soluciones prácticas y reducir el consumo.
- La documentación adecuada así como la medición de recurrencia en fallas permite encontrar causas básicas de los problemas que pueden estar afectando una operación.
- Administrar correctamente los equipos, personal y recursos en general con que se cuenta es muchas veces la primera solución para un problema que aparenta requerir inversiones grandes para entregar resultados.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la compra e instalación de un refrigerador posterior con enfriamiento a base de agua a la salida del compresor principal, para eliminar el problema de la condensación en la red de distribución de aire.
- Se recomienda añadir a la red de distribución de aire del compresor principal la línea de soplado de envases, y eliminar de la misma la operación de burbujeo de tanques batch del área de manufactura de cloro.
- Se recomienda la compra e instalación de un soplador para suministrar caudal de aire a baja presión a los dos tanques batch para efectuar la tarea de burbujeo para mezcla de materias primas.
- Se recomienda el seguimiento a los consumos energéticos de los equipos actuales y los que se instalarán para poder tener un dato real de la reducción de consumo de electricidad.
- Se recomienda implementar un programa de auditoría de aire por área para identificar fugas o equipos en malas condiciones.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Atlas Copco. *Atlas Copco Corporate*. <http://www.atlascopco.com/us/system/splash.asp>
- Carnicer, Enrique. 1991. *Aire Comprimido*. Primera edición. España, Editorial Paraninfo, S.A. 295 págs.
- Cerezo, Jorge. 2006. *Implementación de un Programa de Mantenimiento en una Sopladora de Envases de Polietileno*. Tesis University of Miami. 95 págs.
- Ingersoll, R. 2002. *Ingersoll-Rand*. <http://www.ingersollrand.com/>
- Yunus, Cengel y Michael A. Boles. 2002. *Termodinámica*. 4ta edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. 829 págs.

IX. ANEXOS

Anexo 1 Pistones neumáticos de sopladora



Anexo 2 Máquina llenadora vertical

