

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA
LÍNEA DE AIRE COMPRIMIDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE
ULTRASONIDO ACÚSTICO APLICADO EN UNA PLANTA
PAPELERA”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

CARLOS ENRIQUE SAENZ FREYRE

LIMA – PERÚ

2014

RESUMEN

El presente trabajo está orientado al estudio y mejora de la eficiencia del sistema de aire comprimido en una planta papelera; evaluando las líneas de distribución del aire a presión desde el cuarto de compresores hasta los equipos, accesorios o puntos de consumo.

Se explica y detalla la aplicabilidad del método ultrasonido acústico propagado en aire y estructuras y se resalta las ventajas técnicas y económicas de su implementación, en este caso específico en una planta industrial, en toda su línea de aire comprimido.

El informe se basa en los estudios y desarrollo de una técnica de localización de puntos de fuga de gases a presión, el ultrasonido es generado debido al flujo turbulento producido por el movimiento de un gas de una zona de alta presión a una zona de más baja presión en una fuga, bajo este principio se utilizan equipos portátiles y sistemas fijos de monitoreo para identificar las fugas, cuantificarlas y repararlas logrando así una mayor eficiencia del uso de los compresores.

Este estudio comprende datos obtenidos en planta y la evaluación de estos para determinar mejoras y garantizar la mayor eficiencia de la línea de distribución, tener la seguridad de que todo el aire comprimido está siendo utilizado en los puntos de demanda y por consiguiente mejorar el rendimiento y vida útil de los compresores y reducir el consumo de energía en la planta.

INDICE

RESUMEN	
I. INTRODUCCION	3
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Aire Comprimido	6
2.1.1 Importancia del aire comprimido	8
2.1.2 Características del aire comprimido	8
2.1.3 Ventajas del aire comprimido	15
2.1.4 Usos del aire comprimido	16
2.1.5 Calidad del aire comprimido	17
2.1.6 Cuidados y tratamiento del aire comprimido	20
2.2 Compresores	28
2.2.1 Tipos de Compresores	29
2.3 Elementos de una red de aire comprimido	32
2.3.1 Post enfriador	35
2.3.2 Tanque de almacenamiento	35
2.3.3 Filtro del compresor	35
2.3.4 Secadores de aire	36
2.4 Ultrasonido acústico	36
2.4.1 Principios Físicos de la técnica	38
2.4.2 Aplicaciones del método de detección de gases por ultrasonido	41
2.4.3 Criterios de la detección de gases por ultrasonido	42
2.4.4 Ventajas de la detección de gases por ultrasonido	42
2.4.5 Tasa de fugas	44
2.4.6 Método de medición	46

2.4.7	Procesamiento y cuantificación de la fuga _____	50
III.	ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA LÍNEA DE AIRE COMPRIMIDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ULTRASONIDO ACÚSTICO APLICADO EN UNA PLANTA PAPELERA _____	53
3.1	Objetivos _____	53
3.2	Inspección de la línea de aire comprimido por ultrasonido acústico _____	53
3.2.1	Datos de los compresores _____	53
3.2.2	Equipos Utilizados _____	55
3.3	Resultados de la inspección _____	56
3.3.1	En planta. _____	56
3.3.2	Descarga de datos y post procesamiento de la información. _____	57
3.3.3	Cuantificación del flujo de aire perdido en fugas. _____	58
3.3.4	Cuantificación de costos de las fugas. _____	61
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	65
IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	67
4.1	Conclusiones: _____	67
4.2	Recomendaciones: _____	67
V.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	68
	APENDICE	

I. INTRODUCCION

El presente trabajo fue realizado con el propósito de dar a conocer una herramienta de gran ayuda aplicable en todas las industrias en la actualidad. Es objetivo actual de toda empresa reducir los costos de producción, hoy en día existe una problemática de mucha incidencia en las industrias donde se hace un mal uso del aire comprimido necesario para el proceso productivo, esto se da entre otras causas por la falta de consciencia del personal que considera que el aire a presión, como es aire, es un producto barato o incluso sin costo; el hecho concreto es que al generar aire comprimido se incurre en costos de operación, mantenimiento, horas hombre entre otros.

La cuantificación, identificación, y reducción de fugas de aire comprimido es de vital importancia en todos los sectores industriales, cuando la presión o el flujo de aire comprimido decrece, el primer impulso es inmediatamente colocar un compresor adicional en la línea de trabajo; sin embargo, en la mayoría de estos casos este incremento de aparente demanda no es tal, sino que muchas veces se trata de la aparición de nuevas fugas en la línea de distribución del aire a presión las cuales ocasionan consumos no contemplados que trae perjuicios tanto económicos como de productividad a nuestros procesos productivos.

Un problema típico industrial, del que pocos están exentos, son las fugas en el sistema de aire comprimido, con la consecuente caída de presión en todo el sistema. Esta situación origina varios problemas operativos como son: un trabajo ineficiente de los equipos que utilizan este servicio, lo que causa una menor productividad de los mismos; un aumento en la frecuencia de los ciclos del sistema de compresión, lo que disminuye la vida útil del compresor y de los demás componentes del sistema; un aumento en los requerimientos de mantenimiento, que incrementa los paros no

programados, disminuye la producción y, por último, obligará a elevar innecesariamente la capacidad de nuestro sistema de compresión.

Debido a la gran cantidad de equipos neumáticos con que cuenta la maquinaria de las líneas de fabricación, y a los altos requerimientos de producción de las mismas, el sistema de aire comprimido cumple un papel muy importante en dicho proceso productivo, así como también las otras áreas de servicios. Por este motivo se hace necesario que la disponibilidad de dicho sistema sea alta, y que tanto los equipos principales de generación de aire comprimido como los equipos auxiliares se mantengan en excelentes condiciones de operación y cumplan en todo momento con los requerimientos de consumo y presión adecuados para que la distribución hacia los equipos que lo utilizan se mantenga de acuerdo a las necesidades que producción lo exija.

Los resultados obtenidos sirven de base para obtener un conocimiento claro de la situación actual del sistema de aire comprimido en planta.

Debido a que la mayoría de las veces las fugas del aire comprimido son imperceptibles, inodoras y prácticamente imposibles de ver, se pueden emplear diferentes métodos para su localización; la mejor forma para detectarlas es mediante la utilización de un detector ultrasónico.

Un método simple y muy económico para esto mismo es utilizar espuma de jabón, la cual se aplica con una esponja en las áreas a inspeccionar, pero esto es muy tedioso ya que hay que tener contacto físico con el elemento a inspeccionar esto nos tardaría demasiado, y en adición este método no es trazable ni se puede cuantificar el volumen o gasto de la fuga.

Las fugas pueden estar localizadas casi en cualquier parte del sistema; sin embargo, comúnmente se localizan en: acoplamientos, mangueras, tubos, reguladores de presión, trampas abiertas de condensados, válvulas fuera de operación, sellos de las tuberías, conexiones y juntas en mal estado, por mencionar algunas.

La tubería de distribución ubicada en el exterior está más propensa a la corrosión, debido a la humedad y polvo del ambiente. En muchos casos, las fugas pueden ser producto de una mala o inadecuada aplicación del sellador.

Eliminar una fuga puede ser tan sencillo como apretar bien una conexión o tan complejo como reparar el accesorio con falla; pero, en general, el gasto para eliminarla siempre será más económico que el costo de no hacerlo.

En ocasiones, para eliminar algunas fugas es necesario esperar hasta que se lleve a cabo un paro programado de la planta; mientras tanto, se puede localizar o marcar las fugas con una señal de alerta y eliminarlas cuando el paro se presente.

Un buen programa preventivo de fugas debe incluir los siguientes componentes: Identificación (incluyendo marcado), ajuste, reparación, verificación e involucramiento de todos los empleados.

Todos los usuarios involucrados con el sistema de aire comprimido deben cumplir este programa preventivo de fugas y usos inapropiados de las líneas de aire a presión y lograr la concientización en ellos de los costos para generar el aire comprimido y sus consecuencias de mal utilizarlo.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Aire Comprimido

El aire del ambiente es la materia prima en los sistemas de aire comprimido. El aire está compuesto básicamente de nitrógeno (78%), oxígeno (21%), argón (0.9%) y trazas (0.1%) de bióxido de carbono, neón, helio y kriptón entre otros componentes; físicamente es inodoro, incoloro y no tiene sabor.

El aire comprimido no es otra cosa que el mismo aire del ambiente atrapado en un mecanismo donde se incrementa su presión por la reducción del volumen a través de un proceso mecánico. La máquina que realiza este trabajo es conocida como compresor, y son de dos tipos:

- Los compresores de desplazamiento positivo y
- Los compresores dinámicos o roto-dinámicos.

Un sistema de aire comprimido se divide en dos partes: el suministro y la demanda.

Del lado del suministro, encontraremos el paquete de compresión, compuesto por el compresor, el motor del compresor, controladores y equipo de tratamiento del aire, como filtros, enfriadores, secadores, tanques de almacenamiento, etc.

Por el lado de la demanda, están el cabezal principal, compuesto por las líneas principales de distribución, mangueras, reguladores de presión, válvulas, lubricadores, equipo neumático, etc.

Cada uno de los elementos mencionados, tanto del suministro como de la demanda, tienen una aplicación específica para el mejor desempeño del sistema y, en cada caso, se deberá cuidar su funcionamiento a través de un adecuado mantenimiento.

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

Cuando la condensación ocurre sobre una superficie sólida origina la condensación por goteo o rocío. Por eso se suele denominar punto de rocío a la temperatura a la que se condensa un vapor.

El aire comprimido dentro en este tipo de plantas suele dividirse en:

- **Aire de servicios:** El aire utilizado para servicios generales (tales como pequeñas bombas neumáticas, arrancadores de motor de compresoras de gas, herramientas neumáticas, sopletes de arena a presión, etc.). Es comprimido y almacenado sin necesidad de ser secado.

- **Aire de instrumentos:** Usado en válvulas de control y válvulas todo-nada, así como en pequeños motores neumáticos. En este caso el aire atmosférico es comprimido, almacenado en un tanque de volumen, filtrado y secado para utilizarlo en instrumentos.

El aire a comprimir es tomado de la atmósfera e introducido en los compresores, donde adquirirá las condiciones de presión adecuadas. Una vez comprimido se hace pasar por los prefiltros, bifurcándose a continuación en dos corrientes: la fracción de aire de servicios se conduce directamente a su tanque de almacenamiento, mientras que la parte del aire destinada a instrumentos es secada y filtrada de nuevo en los postfiltros, para posteriormente almacenarse en el tanque de instrumentos.

El aire comprimido en general es utilizado para el manejo de equipos de planta y para instrumentación. El uso del aire comprimido en equipos de planta hace referencia a dispositivos robustos como taladros, pulidores, elevadores, motores y otros. El sistema de aire comprimido es muy habitual en todo tipo de instalaciones industriales.

2.1.1 Importancia del aire comprimido

La tecnología del aire comprimido es actualmente cada vez más importante, pues su utilización en el desarrollo de aplicaciones automatizadas va en constante crecimiento.

En este sentido, el aire comprimido puede utilizarse para la sujeción, desplazamiento, giro, separación, apilado y posicionamiento de piezas, para embalar, llenar, bloquear, dosificar, accionar ejes, abrir y cerrar puertas, transportar materiales, girar piezas, perforar, torneear, fresar, cortar, maquinado en general, etc.

2.1.2 Características del aire comprimido

Mencionaremos en primer lugar las características del aire como compuesto.

El aire atmosférico, que respiramos, contiene gran número de compuestos gaseosos, así como vapor de agua y contaminantes varios (humos, polen, polvo, contaminantes gaseosos cerca de las fuentes de emisión de estos productos, etc.).

Se denomina aire seco, al aire atmosférico una vez eliminados tanto todo el vapor de agua como los contaminantes presentes. Numerosas mediciones han demostrado que la composición del aire seco, es relativamente constante, salvo pequeñas variaciones en función del tiempo, localización geográfica y altitud.

La composición aproximada en % de volumen es:

$N_2 = 78,084\%$; $O_2 = 20,9476\%$; $Ar = 0,934\%$; $CO_2 = 0,0314\%$; $Ne = 0,00181\%$;

$He = 0,000524\%$; $CH_4 = 0,0002\%$; $SH_4 =$ de 0 a $0,0001\%$; $H_2 = 0,00005\%$;

Componentes minoritarios ($Kr, Xe, O_3 = 0,0002\%$)

La masa molar media es de $28,9645$ kg aire seco/kmol aire seco, y por lo tanto su constante específica del aire, R es igual a $287,0$ J/kg.K.

El aire húmedo es una mezcla binaria (de aire seco y vapor de agua). La cantidad de vapor de agua puede variar de 0 (aire seco), hasta un máximo que depende de las condiciones de presión y temperatura; en este último caso, se habla de saturación (un estado de equilibrio entre el aire húmedo y la fase de agua condensada).

La masa molar del agua es $18,01534$ kg/kmol, y la constante específica del agua, R es $461,52$ J/kg.K. Las relaciones matemáticas que utilizamos, son los correspondientes a los utilizados en las mezclas ideales, ya que el aire seco, como gas se encuentra a bajas presiones y temperaturas moderadas y el vapor de agua, normalmente, se encuentra en estado de vapor sobrecalentado.

Estas relaciones son:

$$m_{total} = m_a + m_v \quad (1)$$

$$p_{total} = p_a + p_v \quad (2)$$

$$\rho_{total} = \rho_a + \rho_v \quad (3)$$

$$V_{total} = V_a + V_v \quad (4)$$

Los subíndices a y v significan aire y vapor de agua respectivamente.

No basta con saber la p y T, también necesitamos conocer que cantidad de cada componente tenemos, para ello, además de conocer la p y T necesitamos conocer uno de los siguientes parámetros:

- La humedad relativa.
- El grado de humedad.
- El grado de saturación.

Densidad del vapor de agua: La densidad del vapor de agua en el aire saturado ρ_s y en el aire húmedo ρ_v serán respectivamente:

$$\rho_s = \frac{p_s}{R_v \cdot T} \quad \text{y} \quad \rho_v = \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad (5)$$

ρ_s : Densidad del vapor de agua en el aire saturado

ρ_v : Densidad del vapor de agua en el aire húmedo

R_v : Constante universal de gases ideales

Densidad del aire húmedo.

La densidad del aire húmedo es igual a la suma de las densidades del vapor de agua y del aire seco a las respectivas presiones parciales y a la temperatura de la mezcla.

$$\rho = \rho_v + \rho_a \quad (6)$$

Humedad relativa del aire.

La humedad relativa es la relación entre la densidad del vapor de agua en la mezcla o aire húmedo y la densidad del vapor de agua en una mezcla saturada a la misma temperatura.

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} \quad (7)$$

$$\text{Como } \rho_v = \frac{P_v}{R_v \cdot T} \quad \rho_s = \frac{P_s}{R_v \cdot T} ; \text{ entonces } \varphi = \frac{P_v}{P_s} \quad (8)$$

Grado de humedad del aire o humedad absoluta del aire.

Se denomina grado de humedad del aire a la relación entre la masa de vapor de agua m_v , que hay en cierta cantidad de aire húmedo y la masa de aire seco de dicha cantidad m_a .

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (9)$$

m_v : masa de vapor de agua

m_a : masa de aire seco

w : grado de humedad

La relación entre el grado de humedad y la presión total del aire húmedo y las presiones parciales del vapor de agua y el aire seco es:

$$P_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T \quad (10)$$

$$P_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T \quad (11)$$

A parte de estas tres relaciones, tenemos una serie de parámetros que también son utilizados para definir el estado termodinámico de la mezcla de componentes que forman el aire húmedo.

Grado de saturación del aire.

El grado de saturación del aire es la relación entre el grado de humedad de la mezcla w y el grado de humedad máximo w_s , o grado de humedad de una mezcla saturada a la misma temperatura.

Punto de rocío.

El punto de rocío del aire húmedo es la temperatura a la cual aquél pasa a ser aire húmedo saturado, si se enfría a presión total constante y grado de humedad constante.

Temperatura de bulbo seco.

Es la temperatura que se mide mediante un termómetro normal, que indica la temperatura del aire húmedo.

Temperatura de bulbo húmedo.

Es la temperatura que se mide con un termómetro cuyo bulbo está recubierto de una muselina con agua y está expuesto a una corriente de aire. Entonces, si el aire húmedo no está saturado se produce una evaporación del agua que contiene la tela tanto más intensa cuanto más seco está el aire, y se observa un descenso gradual de su temperatura hasta un valor constante denominado **temperatura de bulbo húmedo**.

Debido a que el aire húmedo en general no se encuentra saturado se produce una evaporación espontánea del agua de la mecha que intenta saturar el aire. El calor latente de evaporación del agua proviene, en una primera fase, de la misma agua, produciéndose un descenso de su temperatura.

Al producirse una diferencia de temperatura entre el agua de la mecha y el aire, se iniciará una transferencia de calor por convección entre el aire y el agua, que contribuirá a la evaporación del agua.

A medida que va descendiendo la temperatura del agua, la contribución térmica del aire será progresivamente mayor que la proveniente de la propia agua, hasta llegar a un punto de equilibrio en que la temperatura del agua (bulbo húmedo del termómetro) alcanza un valor constante, denominada temperatura de bulbo húmedo. En esta situación todo el calor necesario para vaporizar el agua proviene solamente del aire.

Como conclusión, tenemos que la temperatura de bulbo húmedo es un parámetro indicativo del grado de humedad del aire, cuanto más seco sea el aire húmedo mayor será el flujo de agua desde la mecha y menor la temperatura de bulbo húmedo. Y por otra parte cuando una masa de agua se pone en contacto con una corriente de aire, el agua como máximo se puede enfriar hasta la temperatura de bulbo húmedo.

De tablas o cartas psicrométricas más la medición con instrumentos de campo podemos obtener la siguiente información:

- Temperatura seca: La temperatura que registra un termómetro ordinario.

- Temperatura húmeda: La temperatura que indica el termómetro cuyo bulbo está recubierto por una mecha húmeda y expuesta a una corriente de aire rápida.
- Temperatura de rocío: La temperatura a la cual empieza la condensación de humedad cuando el aire se enfría.
- Humedad relativa: Relación entre la presión del vapor de agua contenido en el aire y la presión del vapor saturante a la misma temperatura.
- Grado de humedad: El peso del vapor de agua expresado en gramos por kg de aire seco.
- Entalpía: Cantidad de energía contenido en el aire, contado a partir de 0°C.
- Variación de la entalpía: Cualquiera que sea la temperatura considerada, la entalpía antes mencionada se supone en la saturación. Para el aire no saturado se tendrá que corregir utilizando la línea de variación de la entalpía, en casos que es necesaria una gran precisión. En casos normales de acondicionamiento de aire se puede prescindir de dicha corrección. Viene dado en kJ / kg de aire seco.
- Volumen específico: Los metros cúbicos de aire húmedo que corresponden a 1 kg de aire seco.
- Factor de calor sensible: Relación entre el calor sensible y el total.
- Kilos de aire seco: Constituyen la base de los cálculos psicrométricos y permanecen constantes durante todos los procesos.

Las temperaturas seca, húmeda, de rocío y la humedad relativa están relacionadas de forma tal que cuando se conocen dos de ellas se pueden determinar las restantes.

2.1.3 Ventajas del aire comprimido

Para mencionar algunas de las ventajas del aire comprimido por sus propiedades y siendo comparada por otras fuentes de energía como la energía eléctrica o hidráulica Como ventajas podemos mencionar:

- Se dispone de aire en cantidades ilimitadas.
- Facilidad de transportar aire a través de tuberías.
- Posibilidad de almacenamiento del aire comprimido en depósito.
- El aire comprimido presenta menores riesgos de explosión o fuego.
- El aire comprimido no contamina el ambiente.
- Los elementos de trabajo son relativamente sencillos, en consecuencia de bajo costo.
- El aire comprimido permite obtener velocidades elevadas de movimiento en vástagos de cilindros.
- Excelente velocidad de respuesta.
- Más económico para usos de poca fuerza.

No obstante, para evaluar correctamente sus campos de aplicaciones, también es necesario conocer sus desventajas:

- El aire comprimido debe ser acondicionado o tratado, para disminuir desgastes en los elementos de trabajo por suciedad y agua condensada.
- El aire comprimido no permite obtener velocidades homogéneas y constantes en los vástagos de los cilindros.
- El aire comprimido puede generar fuerzas relativamente bajas (respecto de la hidráulica).
- El escape de aire produce ruido (deben usarse silenciadores).

2.1.4 Usos del aire comprimido

Entre los principales usos del aire comprimido se pueden citar:

- Accionamiento de válvulas de sistema para aire, agua o productos químicos.
- Descarga de depósitos en la construcción, fabricación de acero, minería e industria en general.
- Elevación y movimiento en máquinas de moldeo.
- Pulverización de la cosecha y accionamiento de otros equipos del tractor.
- Pintura por pulverización.
- Sujeción y movimiento en el trabajo de la madera y la fabricación de muebles.
- Montaje de planillas y fijaciones en la máquina de ensamblado y máquinas herramientas.
- Sujeción pegar en caliente o soldar plásticos.
- Sujeción para soldador fuerte y normal.
- Operación de conformado para curvado, trazado y alisado.
- Máquinas de soldadura fuerte y normal.
- Ribeteado.
- Máquinas de embotellado y envasado.
- Máquinas herramientas, mecanizado o alimentación de herramientas.
- Transportadores de componentes y materiales.
- Robots neumáticos.
- Elevadores neumáticos.
- Destornilladores automáticos.
- Equipos con accionamiento neumático (taladros roto percutores, martillos picadores, etc.).

2.1.5 Calidad del aire comprimido

Aunque también es utilizado para actuadores de precisión y pequeños motores neumáticos, así como en equipos tales como turbinas o calderas y válvulas de control estos equipos tienen una función de control de procesos más que de potencia. Debido a la precisión de sus componentes, el aire comprimido usado en ellos ha de tener una calidad superior a la usada en un equipo robusto, el aire debe de tener un contenido de humedad tan bajo que su punto de rocío sea siempre inferior a la menor temperatura en cualquier lugar de la red con el fin de evitar la presencia de condensados.

La necesidad del tipo de aire comprimido está definida por tres factores determinantes:

- 1) Calidad,
- 2) Cantidad y
- 3) Nivel de presión requerido por los usuarios finales en una planta.

Al determinar cuidadosamente estas necesidades, se estará asegurando que la configuración del sistema de aire comprimido sea la más apropiada.

La calidad del aire está determinada por la proporción de humedad y de contaminación (partículas de polvo o aceite) que permita la aplicación final del mismo. En general, se utilizan 4 niveles de calidad en función de su aplicación.

Aire de planta. Aire que puede estar relativamente sucio y húmedo. Por sus características, es empleado en herramientas neumáticas y para usos generales.

Aire para instrumentos. Aire con cantidades de humedad y suciedad moderadas, por lo que es usado en laboratorios, sistemas de aplicación de pintura por rocío o pintura en polvo, controles de climas, etc.

Aire de proceso. Aire con muy poca humedad y casi nula suciedad; por sus características, es utilizado en la industria química, alimenticia, farmacéutica y electrónica.

Aire para respiración. Aire sin humedad y totalmente libre de aceite y polvos, por lo que se usa para recargar tanques de equipos de buceo, en hospitales, consultorios dentales, etc.

Como podemos ver, la calidad del aire comprimido va desde el aire de planta hasta el de alta calidad, como el requerido en respiradores artificiales. Estas calidades se pueden obtener a través de equipos de secado para controlar el nivel de humedad, y por filtración, para el caso de partículas de polvo y aceite.

Es importante subrayar que a mayor calidad del aire, mayor será el costo para producirlo, porque una alta calidad de aire usualmente implica equipamiento adicional, el cual no únicamente incrementa la inversión del capital inicial, sino que también hace que el sistema global sea más caro de operar en términos de consumo de energía y costos de mantenimiento.

Como se ha mencionado, uno de los principales factores cuando se determina la calidad del aire comprimido, es si éste puede o no estar libre de aceite. El aire comprimido libre de aceite puede ser producido con alguno de los compresores denominados libres de aceite, o con compresores que utilizan lubricación por inyección pero que tienen equipo adicional de separación y filtración de aceite. Los compresores rotativos tipo tornillo y los reciprocantes libres de aceite usualmente

tienen un alto costo, inicial y de mantenimiento, en comparación a los lubricados por inyección; sin embargo, el equipo adicional de separación y filtración que éstos últimos requieren, puede causar una reducción en su eficiencia, especialmente en sistemas a los que no se les da un buen mantenimiento.

Antes de seleccionar un compresor libre de aceite o uno lubricado por inyección, se deberán de considerar cuidadosamente las necesidades del proceso y de los equipos, esto en cuanto al nivel de aceite permitido en el aire, incluyendo en estas consideraciones el riesgo y el costo asociado de terminar con un producto contaminado.

El mantenimiento de la calidad del aire es muy importante para la producción industrial que incluso la International Standard Organization, entidad multinacional que crea las normas ISO, estableció una norma, la ISO 8573.1, que establece las clases de aire comprimido, según el rubro industrial, en la tabla 1 se muestra esta norma con las clases de aire comprimido.

Este estándar significa que el aire que se entregue sea limpio y que mantenga condiciones constantes de operación, sin importar si se produce un cambio en los requerimientos o en las condiciones climáticas.

Como toda fuente de energía, el aire comprimido debe ser confiable, estar disponible permanentemente y mantener un rendimiento constante, esto se alcanza con el tratamiento previo antes de ingresar al compresor, en el siguiente punto se detallará los procesos y equipos necesarios para mantener las características y por ende una calidad definida del aire.

2.1.6 Cuidados y tratamiento del aire comprimido

Como consecuencia de los puntos anteriores, el aire comprimido, antes de ser distribuido a la red, debe haberse secado hasta un punto de rocío que sea inferior a la temperatura ambiente en donde se utiliza, ya que si no ocurre este hecho, pueden encontrarse condensaciones en la red de distribución y en los puntos de utilización, las cuales pueden provocar una serie de inconvenientes, como pueden ser:

- Corrosión en las tuberías metálicas.
- Entorpecimiento en los accionamientos neumáticos.
- Errores de medición en equipos de control.
- Bajo rendimiento de la instalación.

Los procedimientos de deshumidificación son:

- 1) Mediante refrigerador de agua a la salida del compresor.
- 2) Mediante refrigerador de aire a la salida del compresor.
- 3) Mediante equipo frigorífico, a la salida del calderín.
- 4) Mediante secador por adsorción, a la salida del calderín.
- 5) Mediante secador por pastillas desecantes, en el circuito.
- 6) Mediante filtros separadores cerámicos, en el circuito.
- 7) Mediante separadores centrífugos, en el circuito.

Tabla 1. ISO 8573, Calidad del aire comprimido

ISO8573-1:2010	Partículas sólidas				Agua	Aceite	
CLASE	Número máximo de partículas por m ³			Concentración	Punto de rocío	Líquido	Aceite Total (aerosol, líquido y vapor)
	0,1-0,5 micron	0,5-1 micron	1-5 micron	Masa mg/m ³		g/m ³	mg/m ³
0	Según lo que establezca el usuario del equipo y exigencias mas elevadas que en la Clase 1						
1	<=20000	<=400	<=10	-	<= -70°C	-	0,01
2	<=400000	<=6,000	<=100	-	<= -40°C	-	0,1
3	-	<=90,000	<=1000	-	<= -20°C	-	1
4	-	-	<=10000	-	<=+- 3°C	-	5
5	-	-	<=100000	-	<= +7°C	-	-
6	-	-	-	<=5	<= + 10°C	-	-
7	-	-	-	5-10	-	<= 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5-5	-
9	-	-	-	-	-	5-10	-
x	-	-	-	>10	-	> 10	> 10

Refrigerador de agua a la salida del compresor.

Se coloca inmediatamente después del compresor, estando preparados para eliminar entre el 50 al 80 % de toda la humedad que aspira el compresor.

Estos refrigeradores de agua, son del tipo carcasa y tubos, pasando por el interior de los tubos el aire, y por el exterior a contracorriente el agua.

Se utilizan para grandes caudales de aire comprimido (hasta los 10500 m³/h). La temperatura de salida del aire del refrigerador es, aproximadamente, 10 °C superior a la de entrada del agua de refrigeración, se admiten como temperaturas óptimas del agua de refrigeración, a la entrada, del orden de 10 °C a 25 °C.

Llevar como accesorios:

- Termómetro de salida del aire.
- Manómetro.
- Válvula de seguridad.
- Purga manual o automática.

Refrigerador de aire a la salida del compresor.

El refrigerador de aire, que se coloca a la salida del compresor, es del tipo de flujo cruzado, con batería aleteada, por el interior de los tubos de la batería pasa el aire comprimido. Son escasamente utilizados debido al bajo rendimiento, cuando las

temperaturas de aire exterior, suben de los 15 °C. Sólo se utilizan cuando no existe disponibilidad de agua, o esta resulta ser muy costosa.

Secador frigorífico.

Este secador, es un equipo frigorífico, que reduce la humedad del aire comprimido enfriándolo hasta la más baja temperatura posible, que oscila entre los +2 °C a los +4°C.

Son los secadores de consumo energético más bajo, pero da un grado de calidad del aire medio, un secador de este tipo se selecciona según caudal nominal de aire, presión de trabajo y punto de rocío deseado, en general, las condiciones suelen ser:

- Punto de rocío: +3 °C.

- Presión: 7 bar.

En el mercado se comercializan secadores frigoríficos desde los 15 m³/h hasta los 15000 m³/h, variando la potencia del compresor del equipo frigorífico desde 1/6 CV hasta los 50 CV.

Secador por adsorción.

Este secador realiza el secado por medio de un adsorbente sólido de naturaleza regenerable. Es un secador de alta eficacia, logrando temperaturas de rocío del aire comprimido del orden de -20 °C a -80 °C, con lo que se consigue un secado total para las aplicaciones industriales.

Estos secadores están constituidos por dos torres o elementos secadores gemelos, que contienen la respectiva carga de adsorbente. Una secuencia de alternancias cíclicas de secado y regeneración, en el par de torres permite disfrutar de un flujo continuo de aire comprimido seco.

Existen tres tipos según como se realiza la regeneración:

- De regeneración por recirculación de aire comprimido, ya que la realizan mediante la recuperación del calor sensible del propio aire comprimido, que sale del compresor a una temperatura elevada.

Mediante un intercambiador de calor, el fluido que sale del compresor (sin refrigerador posterior) cede su calor al propio deshidratante, en el periodo de regeneración, y provoca que al aumentar la temperatura en éste se produzca la desadsorción.

- De regeneración por resistencia eléctrica, son los más comunes, se utiliza una fuente de energía externa (generalmente resistencias eléctricas) para la regeneración del adsorbente. Son los más seguros de los tres tipos.

- De regeneración por transferencia de vapor, difiere esencialmente de los dos tipos anteriores porque no le hace falta ningún tipo de aportación de calor; utilizan, para la misma, una limitada fracción del propio aire seco, que se hace circular en barrido por la torre de regeneración, debido a la diferencia de las presiones vapor entre el agua en el adsorbente y el aire seco, al que se le reduce la presión, hasta un poco por encima de la atmosférica, (humedad relativa muy baja), se produce una transferencia de masa muy elevada, produciéndose el secado del adsorbente. Este tipo de secador se utiliza

para presiones elevadas, ya que aumenta su rendimiento directamente con la presión, no se utiliza para presiones inferiores a los 5 bar.

Cuando las necesidades de la calidad del aire son muy bajas, se puede realizar la deshumidificación, con una serie de equipos colocados en el circuito. Suprimiendo los secadores convencionales (frigoríficos y regeneradores) y manteniendo en el proyecto los refrigeradores posteriores. Estos equipos, anteriormente comentados, son:

Secador por pastillas desecantes.

Utiliza pastillas desecantes y delicuescentes, altamente higroscópicas, que se funden y licúan al ir reteniendo el vapor de agua contenido con el aire a secar. Aunque son muy económicas, necesitan reponer periódicamente la carga del producto que se emplee, además que para un correcto funcionamiento, necesitan que el aire que entre esté lo más frío posible, no son recomendables temperaturas de aire superior a los 30 °C, en general se colocan después del calderín en el exterior.

Filtros separadores cerámicos.

Estos filtros están diseñados para eliminar un 70% - 80% del agua y aceite contenidos en el aire. Se suelen colocar a la salida del refrigerador posterior o después del calderín, ya que aumenta su rendimiento si el aire a limpiar se encuentra a temperaturas bajas.

La separación del condensado se realiza en tres etapas:

- a) Un separador por gravedad elimina las partículas líquidas y sólidas de tamaño mayor que se recogen en el fondo del separador.
- b) Una malla filtrante se dedica a eliminar las partículas sólidas y líquidas de tamaño intermedio, que también se depositan en el fondo del separador.
- c) Por último, el aire atraviesa un conjunto de bujías cerámicas, destinadas a suprimir las partículas mayores de 10 micrones. Estas bujías son de duración ilimitada. Su selección se realiza por el caudal de aire que va a tratar y la presión de trabajo.

Separadores centrífugos.

Son el equipo más económico de los tres, pero tiene unas condiciones de funcionamiento muy rígidas. Funcionan incrementando la velocidad del aire a tratar y cambiando su dirección (ciclón), con lo que las partículas sólidas y líquidas que estén en suspensión en el aire, por la fuerza centrífuga quedan retenidas en las paredes del recipiente y por decantación caen al fondo del separador de donde son extraídas al exterior.

También se colocan después del calderín para permitir que el aire se enfríe lo mayor posible antes de entrar en él.

Por último tenemos un separador, que aunque su función no es la de secado, si tiene una gran importancia en los secadores por adsorción:

Separadores de aceite.

Tienen el objetivo de retener el aceite o vapores de aceite que provienen del compresor.

Este aceite quemado, si se pone en contacto con los separadores por adsorción, crean una película sobre él, que impide el paso del aire y el funcionamiento correcto de la instalación, por otra parte si se pone en contacto con los aceites especiales de lubricación del aire comprimido para su utilización neumática, hace que éstos pierdan sus propiedades lubricantes.

La temperatura del aire de entrada no debe exceder los 40 °C, para su correcto funcionamiento.

Su funcionamiento consta de dos fases:

- a) Un separador ciclónico, decanta las partículas sólidas y líquidas que contiene el aire comprimido.
- b) Mediante un absorbente selectivo retiene el aceite.

La fuente principal de deterioros y desgastes de los componentes neumáticos es por utilizar aire no tratado adecuadamente.

Las impurezas más frecuentes en un sistema neumático son partículas sólidas (provenientes de desgastes metálicos, desprendimientos de óxido en cañerías, polvo atmosférico), aceite (proveniente del compresor) y agua (se forma por condensación

de la humedad ambiente contenida en el aire y que ingresa en la aspiración del compresor).

Si dichas impurezas arrastradas por el flujo de aire llegan a los puntos de consumo pueden provocar atascamientos de válvulas, oxidación de partes internas, desgastes de partes móviles, obturación de orificios, errores en instrumentos de medición.

De lo visto, se deduce la importancia del adecuado tratamiento del aire comprimido para que esté seco y limpio. El tratamiento puede realizarse a la salida del compresor (post-enfriadores), a la salida del depósito (secadores) y antes de los puntos de consumo (unidad de mantenimiento FRL: Filtra-Regula-Lubrica). Esta última no puede estar ausente en ningún caso, las restantes dependerán de la magnitud de la instalación

2.2 Compresores

El compresor aspira el aire de la atmosfera y lo comprime en un volumen más pequeño, almacenándolo después en un depósito. Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías. Los compresores móviles se utilizan en la rama de la construcción o en máquinas que se desplazan frecuentemente.

En el momento de la planificación es necesario prever un tamaño superior de la red, con el fin de poder alimentar aparatos neumáticos nuevos que se adquieran en el futuro. Por ello, es necesario sobredimensionar la instalación.

Hay diferentes tipos de compresores de aire, pero todos realizan el mismo trabajo: toman aire de la atmósfera, lo comprimen para realizar un trabajo y lo regresan para ser reutilizado.

2.2.1 Tipos de Compresores

Compresores de tornillo.

Son máquinas donde los rotores helicoidales engranados entre si y ubicados dentro de una carcasa; comprimen y desplazan el gas hacia la descarga. Los lóbulos de los dos rotores no son iguales, los del macho o rotor principal son de forma tal que se ajustan a las cavidades de la hembra o rotor conducido. Por lo general el rotor principal tiene menos lóbulos y por ello opera a mayor velocidad. El principio de estos compresores se basa en que a medida que los rotores giran, el volumen entre los rotores disminuye obteniéndose progresivamente la compresión deseada del aire que llena el espacio entre los lóbulos. La carencia de válvulas de aspiración y descarga, y la inexistencia de fuerzas mecánicas desequilibradoras; hacen que el compresor de tornillo pueda funcionar a elevadas velocidades. En consecuencia, combina una elevada capacidad con reducidas dimensiones. Los compresores de tornillo de tipo seco utilizan engranes de sincronización externos para los rotores macho y hembras, al no haber contacto entre rotores ni entre estos y la carcasa, no se necesita ningún tipo de lubricación dentro de la cámara de compresión y el aire suministrado es exento de aceite.

Compresores Centrífugos.

En estos compresores el flujo del gas es esencialmente radial; estos componentes están constituidos por uno o más rodetes y un número de pasajes divergentes fijos a la carcasa, denominado difusores, en donde el fluido es desacelerado. El principio de funcionamiento de estos compresores es que el gas a ser comprimido entra por el centro de una rueda giratoria provista con álabes radiales (rodete o impulsor), los cuales lanzan el gas hacia la periferia mediante la fuerza centrífuga. Antes de ser guiado el gas hacia el centro del siguiente impulsor, se le hace pasar por un difusor que transforma la energía cinética en presión. Los compresores radiales se adaptan bien a la refrigeración intermedia en cada etapa o a cada grupo de ellas, con lo cual el proceso se hace más isotérmico con la consiguiente mejora del rendimiento. Los refrigeradores son voluminosos debido a que estos compresores son muy sensibles a la caída de presión.

Las velocidades de funcionamiento son altas en comparación a otros compresores: las unidades comerciales operan en su mayoría a 20000 revoluciones por minuto con fuertes tendencias a aumentar; a su vez los compresores radiales por debajo de 400 kPa (58,01 psi) de presión efectiva, normalmente no se refrigeran.

El compresor de **desplazamiento positivo**. Las dimensiones son fijas. Por cada movimiento del eje de un extremo al otro tenemos la misma reducción en volumen y el correspondiente aumento de presión (y temperatura). Normalmente son utilizados para altas presiones o poco volumen. Por ejemplo el inflador de la bicicleta. También existen **compresores dinámicos**. El más simple es un ventilador que usamos para aumentar la velocidad del aire a nuestro entorno y refrescarnos. Se utiliza cuando se requiere mucho volumen de aire a baja presión.

El compresor de émbolo: es un compresor de aire simple. Un vástago impulsado por un motor (eléctrico, diésel, neumático, etc.) es impulsado para levantar y bajar el émbolo dentro de una cámara. En cada movimiento hacia abajo del émbolo, el aire es introducido a la cámara mediante una válvula. En cada movimiento hacia arriba del émbolo, se comprime el aire y otra válvula es abierta para evacuar dichas moléculas de aire comprimidas; durante este movimiento la primera válvula mencionada se cierra. El aire comprimido es guiado a un tanque de reserva. Este tanque permite el transporte del aire mediante distintas mangueras. La mayoría de los compresores de aire de uso doméstico son de este tipo.

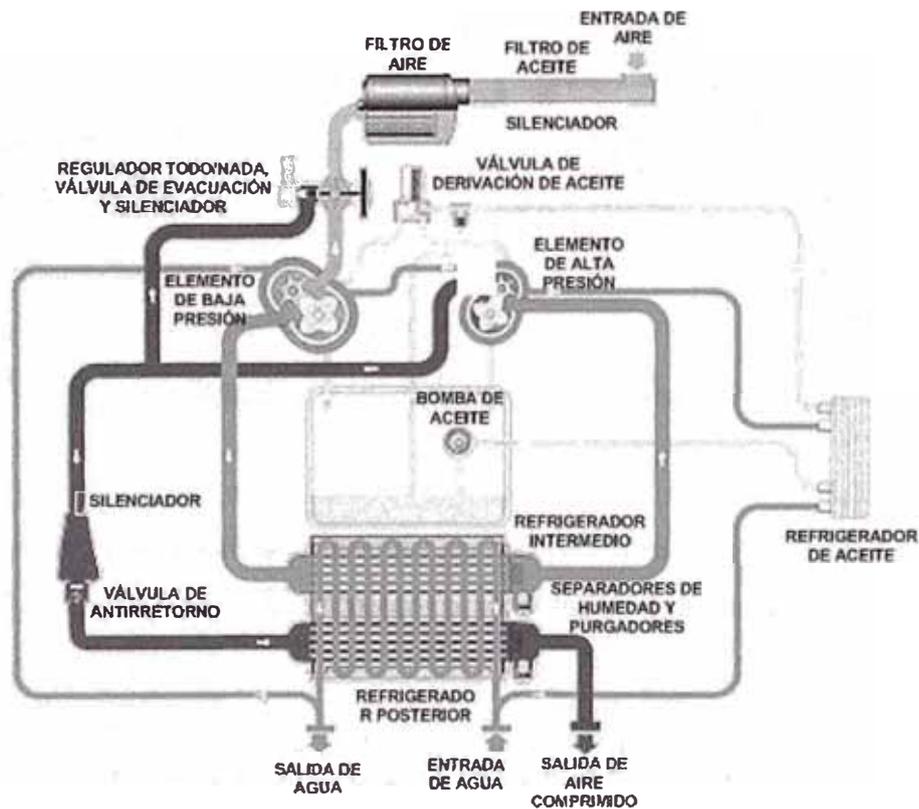


Figura 1. Diagrama funcional de un compresor Atlas Copco.

En la figura 1, se muestra un diagrama esquemático de los componentes y funcionamiento de un compresor típico, donde se puede observar la toma de aire del medio ambiente, y siguiendo su circuito pasando por los filtros, la refrigeración y los elementos que le generan la presión de salida.

2.3 Elementos de una red de aire comprimido

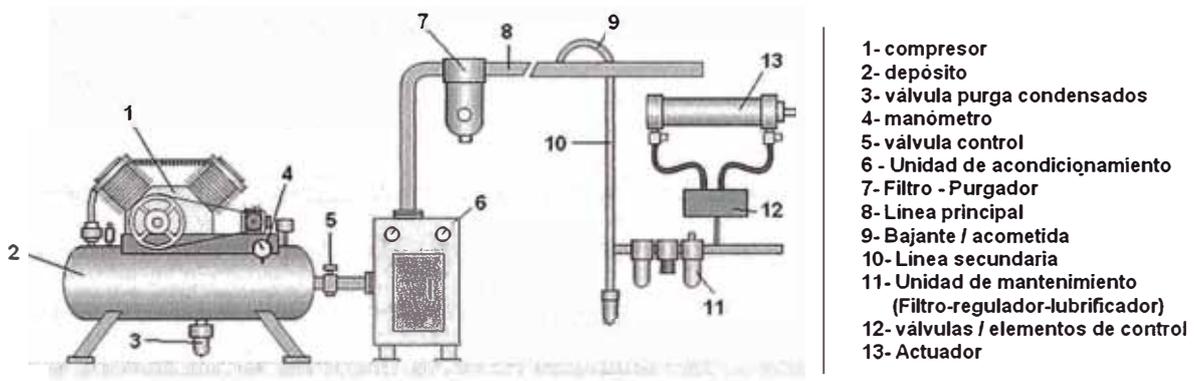


Figura 2. Principales elementos de una red de aire comprimido

En la figura 2, se muestra cada uno de los componentes que conforman una red de aire comprimido desde la generación en el compresor hasta el punto de uso un actuador neumático.

Para producir aire comprimido se utilizan compresores, que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Todos los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central de generación. De esta manera no es necesario calcular ni proyectar la transformación de la energía para cada consumidor. El aire

comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

Las centrales de generación pueden ser fijas, como en la mayoría de las industrias, o móviles, como en la construcción o en máquinas que se desplazan frecuentemente. Como norma general, al planificar una instalación, es necesario prever un tamaño superior de la red, con el fin de poder alimentar aparatos neumáticos nuevos que se adquieran en el futuro. Por ello, es necesario sobredimensionarla, con el fin de que el compresor no resulte más tarde insuficiente, puesto que toda ampliación posterior en el equipo generador supone gastos mayores que si se tiene en cuenta desde un principio.

La capacidad del sistema de aire comprimido se determina sumando el consumo promedio requerido por cada una de las herramientas y por la operación de cada proceso en toda la planta, tomando en cuenta factores de carga de cada uno de éstos. Todo sistema puede presentar picos de demanda que se pueden satisfacer a través de tanques de almacenamiento o tanques pulmón; éstos serán más efectivos si se localizan lo más cerca posible de donde se requieran estas altas demandas. En muchos casos, una evaluación cuidadosa de la demanda del sistema nos puede llevar a una adecuada estrategia de control a través de estos tanques, de tal suerte que podamos reducir la capacidad global del compresor que se vaya a adquirir.

El sobredimensionar los compresores de aire es extremadamente ineficiente, porque la mayoría de los sistemas, operando a carga parcial, consumen más energía por unidad de volumen de aire producido. Es preferible comprar varios compresores pequeños con un control secuenciador de arranque, permitiendo así una operación más eficiente cuando la demanda es menor que la demanda pico.

Si a pesar de que el sistema fue diseñado apropiadamente y recibe un mantenimiento adecuado, sigue experimentado problemas de capacidad, una alternativa, antes de añadir otro compresor, es volver a analizar el uso del aire comprimido en cada una de las áreas de aplicación, ya que tal vez pueda utilizar, de manera más efectiva, sopladores o herramientas eléctricas o, tal vez, simplemente pueda detectar usos inapropiados.

Otra forma efectiva de diseñar y operar apropiadamente un sistema de aire comprimido es evaluar su perfil de carga. Las variaciones de demanda durante el tiempo total de uso del aire comprimido es una de las principales consideraciones cuando se diseña un sistema de esta índole.

Las plantas con grandes variaciones de demanda necesitarán de un sistema que opere eficientemente bajo carga parcial; en tales casos, el uso de compresores múltiples con controles secuenciadores de arranque, pueden operar el sistema de forma más económica. En cambio, en plantas con un perfil de carga con pocas o nulas variaciones, se pueden utilizar estrategias de control simples.

Por otro lado, los usos inapropiados dan lugar a una demanda artificial ya que requieren de un exceso en el volumen de aire y, por consecuencia, una mayor presión que el requerido por las propias aplicaciones. El uso de controladores de flujo puede ayudar a minimizar esta demanda artificial.

El nivel de presión del sistema debe ser definido a través de los requerimientos de presión de cada una de las herramientas que normalmente han sido probadas por sus fabricantes a dichas presiones. En cambio, las presiones requeridas por los diferentes procesos deben ser especificadas por el ingeniero de proceso. Con ambos requerimientos se puede definir el nivel de presión del sistema, no olvidando que a

mayor nivel de presión el sistema será más costoso, desde el punto de vista energético y de mantenimiento.

Por otro lado, cuando se defina el nivel de presión del sistema, se deben de tomar en cuenta las pérdidas del sistema a través de las tuberías y accesorios de los equipos adicionales, como secadores, separadores, filtros, etc.

2.3.1 Post enfriador

Esencialmente un post-enfriador es un intercambiador de calor en el cual el elemento que pierde calor es el aire comprimido, mientras que el medio que lo gana es algún refrigerante, usualmente aire o agua. El objetivo de este accesorio es disminuir la temperatura del aire luego de la compresión. Al tener lugar una disminución brusca de temperatura se presentarán condensados, por lo cual podemos decir que este equipo sirve también para disminuir la cantidad de agua contenida en el aire. Esto implica que siempre que se utilice un post-enfriador es necesario instalar algún medio para retirar los condensados que este genera.

2.3.2 Tanque de almacenamiento

Parte integrante de todo sistema de aire comprimido son unos o varios depósitos de almacenamiento para el fluido comprimido; cuyas principales funciones son: almacenar aire para suplir las demandas de picos superiores a la capacidad del compresor, contribuir al enfriamiento y separación del condensado, amortiguar las pulsaciones del compresor recíprocante.

2.3.3 Filtro del compresor

Para asegurar un buen funcionamiento del compresor, este deberá llevar siempre un filtro de aspiración eficaz. Este dispositivo es utilizado para eliminar las impurezas

del aire antes de la compresión con el fin de proteger al equipo compresor. De otra forma, los abrasivos que hay en el aire llegarían a la unidad y podrían causar desgaste excesivo en los cilindros, anillos, pistón, cojinetes, entre otros. Un buen filtro deberá cumplir los siguientes requisitos: gran eficacia de separación de impurezas, buena capacidad de acumulación, baja resistencia al flujo de aire, construcción robusta, entre otros.

2.3.4 Secadores de aire

Como el enfriamiento producido en el post-enfriador no es suficiente para impedir una posterior condensación en el sistema de aire comprimido, es necesario un enfriamiento adicional. Este trabajo lo realiza un secador de aire por refrigeración, el cual efectúa el intercambio de calor entre un refrigerante, usualmente alcohol o amoníaco, y el aire comprimido por medio de un intercambiador. Debido a que el punto de congelación del agua es de 0 °C, el circuito de refrigeración se ajusta hasta enfriar el aire entre 2 °C a 5 °C como mínimo.

2.4 Ultrasonido acústico

El ultrasonido se define como ondas acústicas o sonoras de alta frecuencia que están por encima del espectro auditivo del oído humano. El punto más bajo es generalmente 20 kHz y el superior ya está en el rango del mega Hertz. Los seres humanos somos capaces de detectar sonidos en el rango de 20 Hz a 20 kHz. Los instrumentos portátiles que miden la intensidad del ultrasonido transportado en el aire o por medio de una estructura cubren frecuencias desde 20 kHz hasta 100 kHz.

Todos los equipos en operación y la mayoría de fugas producen un amplio rango de sonidos. Los componentes de ultrasonido de alta frecuencia tienden a concentrarse a lo largo de un patrón estrecho. Cuando se usan instrumentos de ultrasonido para detectarlos es relativamente fácil separar tales señales del ruido de fondo de la planta y detectar su localización exacta.

La detección de fugas con ultrasonido cubre un amplio rango de fugas: fugas a presión, fugas de vacío.

Utilizando las características del ultrasonido, localizar fugas es una tarea efectiva debido a:

- La direccionalidad de las ondas de sonido de alta frecuencia hacen a la fuente del sonido localizable de una manera sencilla.
- Intensidad de la señal: mientras más se acerca, mas sonido detectará
- Frecuencia de detección ajustable, haciendo la prueba efectiva aun en ambientes industriales con alto contenido de ruido.

En muchas instalaciones industriales los instrumentos de detección de ultrasonido son utilizados por cuestiones de seguridad (fugas de gases explosivos) protección ambiental (fugas de gases contaminantes), programas de conservación de energía (fugas de gases que merman la eficiencia de un sistema) y/o aseguramiento de calidad (fugas que impactan de manera directa al proceso productivo) lo cual se traduce en lo siguiente:

- Eficiencia de producción
 - Para alcanzar una mejor eficiencia en sus procesos

- Operar los sistemas presurizados o en vacío en las condiciones deseadas.
- Eficiencia de la inspección y seguridad en las plantas
 - Detección de gases inflamables o explosivos para controlar aspectos de seguridad.

2.4.1 Principios Físicos de la técnica

El método UGLD de sus siglas en inglés (Ultrasound Gas Leak Detection) significa detección de fugas de gas por ultrasonido.

Debido a que las longitudes de onda del ultrasonido están muy lejos del rango audible, los instrumentos de ultrasonido tienen mayor capacidad de localizar y aislar la fuente de problemas en ambientes de plantas ruidosas. Para hacer estos instrumentos amigables con el usuario la electrónica interna convierte las señales de ultrasonido a señales dentro del rango audible. Una vez convertidas, las señales pueden escucharse a través de audífonos o visualizarse como incrementos de intensidad en un medidor o display. Es por esto que los detectores también son llamados convertidores. La capacidad de escuchar y ver este ultrasonido convertido les permite a los inspectores confirmar un diagnóstico del punto exacto de la fuga, ya que pueden discriminar entre ruidos del equipo no relevantes y sonidos asociados con una fuga.

Se detecta el ultrasonido emitido por el flujo turbulento producido por el movimiento de un gas de una zona de alta presión a una zona de más baja presión en una fuga. El principio de funcionamiento se basa en el flujo turbulento provocado por el escape de

gas a presión, esto genera un alto contenido de ultrasonido, este es el sonido que está por encima del rango auditivo humano, pero puede ser oído con dispositivos receptores de ultrasonido acústico y rastreado hasta su origen, es decir hacia la fuente que está generando el ultrasonido, en este caso lo genera la fuga, al pasar el fluido de un ambiente de mayor presión a uno donde la presión es menor. Imagínese la fuga de aire de un neumático. Debido a que tal fuga es una fuga grande, el oído puede detectar este sonido, sin embargo, el oído oye sólo aproximadamente un tercio del espectro real de sonido que existe. El sonido de las fugas es principalmente ultrasónico que su oído no puede detectar.

En un tramo de tubería recta conectada a un suministro de gas donde el otro extremo está abierto a la atmósfera no se genera ultrasonido si el volumen y la velocidad del gas a través del ducto es tal que no da lugar a la turbulencia.

Sin embargo, para ese mismo flujo, con el extremo cerrado pero con una abertura tan pequeña como 0,005 pulgada puede generar suficiente ultrasonido para ser escuchado a varios metros de distancia.

Normalmente estas aberturas no son agujeros lisos o limpios, los bordes de estos agujeros o grietas son bordes dentados, irregulares, donde el gas que se escapa a través de estos orificios, se ve obligado a un estado de turbulencia. Dentro de un tubo donde un gas puede estar fluyendo, el flujo es normalmente laminar que significa que una capa dada de gas no se mezcla con capas por encima de ella o debajo de ella. Esta condición ocurre en un largo tramo del ducto sujeta a la velocidad del fluido, pero al salir del sistema y debido a lo ya explicado este gas entra en turbulencia generando sonido en lo ancho del espectro, pasando por lo audible por el ser humano y lo no audible o ultrasonido. La intensidad del sonido generado por una fuga es una muy compleja y está en función de la viscosidad, la temperatura, la velocidad del fluido

que está en movimiento, el número Reynolds, el diferencial de la presión a través de la fuga, y las dimensiones físicas y características del orificio.

Amplitud (dB)

El término amplitud es el parámetro que describe el nivel de sonido o el volumen del sonido acústico, como analogía se puede presentar el caso de estar frente a la radio y al subir el volumen, aumenta el nivel de sonido y en el mundo de la acústica, nos dice que el nivel de sonido (dB) aumenta.

Frecuencia (Hz)

La frecuencia de los términos es el parámetro que describe los tonos altos y bajos en el sonido acústico. Para ilustrar esto, bajo frecuencias se pueden escuchar desde los bombos en la música, mientras que las frecuencias altas se pueden escuchar desde por ejemplo platillos. Esto significa que hay frecuencias bajas y altas frecuencias.

Frecuencia y Amplitud

Detección de fugas de gas ultrasónico se diferencia de la detección de gas convencional, principalmente porque responde a la acústica aerotransportada el sonido del escape de gas, y no mediante la detección de las moléculas de gas. Dos nuevos parámetros son fundamentales para entender tecnología ultrasónica - amplitud y frecuencia, donde la amplitud se mide en decibelios [dB] y la frecuencia es medido en hertz [Hz].

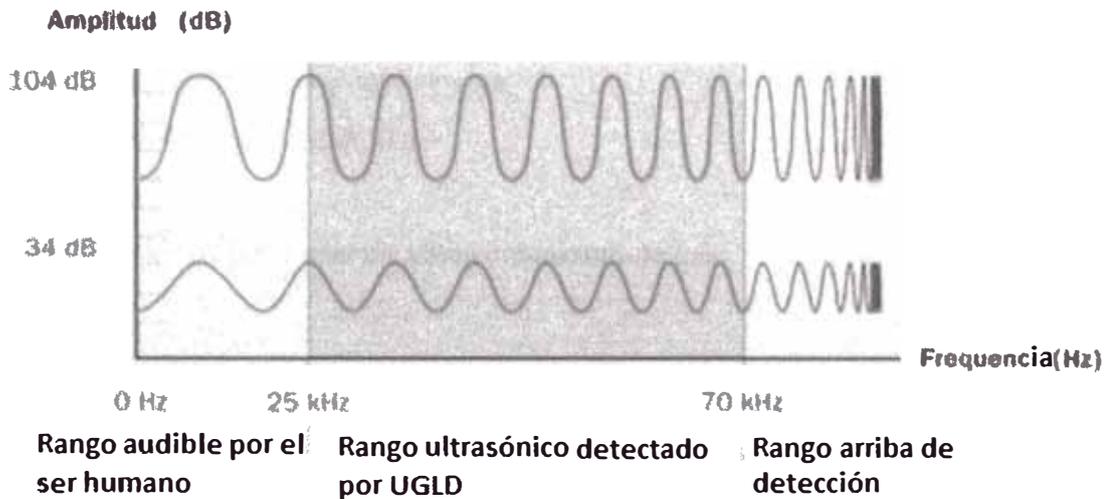


Figura 3. Gráfica de la relación entre la amplitud (dB) y la frecuencia (Hz).

La figura 3, muestra los rangos audibles y no audibles por el ser humano, nótese que en el rango audible son detectables tanto los sonidos de bajas y de altas frecuencias. El oído humano puede escuchar las frecuencias altas y bajas, pero sólo dentro de un cierto rango de frecuencias típicamente de 20 Hz a 20,000 Hz (20 kHz). Este rango de frecuencia también se llama el intervalo de frecuencia audible. Las frecuencias superiores a 20 kHz se llaman frecuencias ultrasónicas. El oído humano no puede oír el sonido acústico en este rango de frecuencia. El método de Ultrasonido acústico es diseñado para ignorar frecuencias sónicas audibles y en único sentido frecuencias ultrasónicas en el rango de 20 kHz a 100 kHz.

2.4.2 Aplicaciones del método de detección de gases por ultrasonido

- Plantas de procesamiento químico
- Traslado, almacenamiento y descarga (buques)
- Compresores de gas y estaciones de medición
- Turbinas a gas de plantas de generación de energía.
- Tanques de almacenamiento de hidrógeno

- Las plantas de regasificación de GNL
- Plataformas marinas de petróleo y gas
- Terminales Onshore Oil & Gas
- Refinerías.
- Instalaciones subterráneas de almacenamiento de gas

2.4.3 Criterios de la detección de gases por ultrasonido

- El elemento de destino debe estar en la fase gaseosa; no puede ser un líquido.
- 100 psi que normalmente se requiere para generar suficiente ultrasonido para producir un área suficiente de cobertura.

2.4.4 Ventajas de la detección de gases por ultrasonido

- Rápida velocidad de respuesta
- Aplicación en el exterior son ideales ya que la tecnología es inmune a los efectos del viento diluyendo el escape de gas.
- La detección de gases por ultrasonido no se ve afectada por sonidos audibles (al ser humano).
- No requiere calibración de rutina.

Velocidad de respuesta

La principal ventaja del método de ultrasonido en comparación con un detector de gas convencional es que no necesita esperar la acumulación del gas y que incrementa su concentración hasta que esta sea detectada.

La velocidad total de respuesta para un detector de ultrasonido se puede calcular como:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{detector}} + T_{\text{ultrasound}} \quad (12)$$

T_{detector} es el tiempo de retardo de alarma implementado en el instrumento, comúnmente unos 10 segundos. $T_{\text{ultrasound}}$ representa el tiempo que tarda el ruido ultrasónico para viajar de la fuente de la fuga hacia el detector. Esto es típicamente algunos milisegundos.

Una de las aplicaciones para ultrasonido en la inspección de sistemas de aire comprimido con la utilización de softwares patentados para fugas de gases comprimidos, los usuarios adquieren la capacidad de localizar y reportar en base a un costo calculado por fuga.

El caudal total que circula en los compresores de aire es una función de la carga del equipo, más las fugas. Las fugas de aire comprimido son la mayor y más importante fuente de desperdicio de energía en la mayoría de estos sistemas.

- El volumen de pérdidas aumenta con la presión y las horas de operación del sistema.
- Las pérdidas de aire aumentan en función directamente proporcional al cuadrado del diámetro del agujero.
- El costo que representan las fugas puede encontrarse multiplicando la cantidad de aire desperdiciado, por la energía necesaria para comprimirlo a la presión del sistema y por el costo de energía.

En la figura 4, el detector de gas convencional anterior mide la concentración de gas, esto depende de muchas variables como el viento, densidad del gas, la direccionalidad de la fuga y donde el sensor es posicionado en relación con la fuga, donde LEL por sus siglas en inglés significa límite inferior de explosividad.

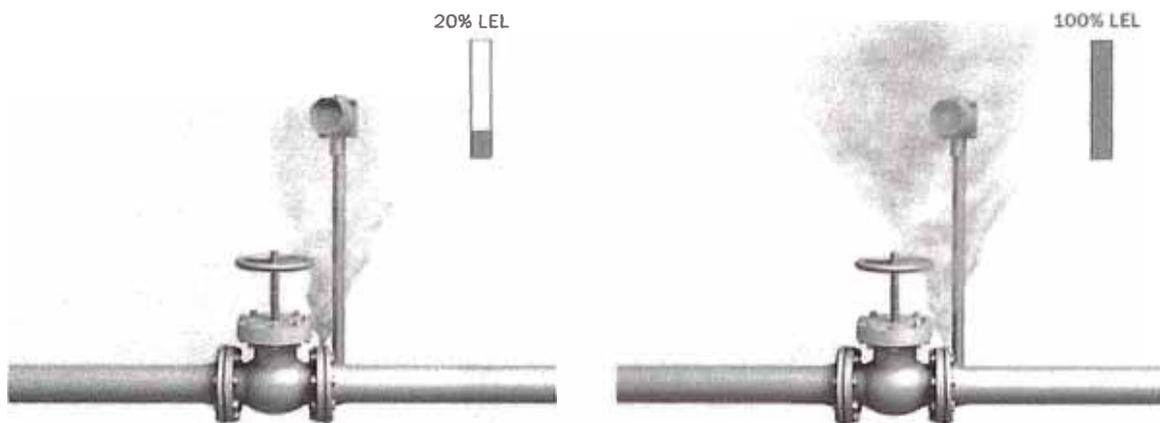


Figura 4. Detector de gas convencional que mide la concentración de gas.

2.4.5 Tasa de fugas

El detector de fugas por ultrasonido proporciona una medida del sonido ultrasónico medido en decibeles (dB).

Cuando hay una fuga de gas con un caudal de fuga de $0,1 \text{ kg / s}$ dentro del área de cobertura del detector, el nivel de sonido se incrementa y se puede programar una alarma, esto se hace necesario cuando el gas que fuga es un gas peligroso.

Los detectores de fuga por ultrasonido no son diseñados para escapes de pequeños agujeros ni para las grandes rupturas de tuberías. Fugas por picaduras aumentan de tamaño con el tiempo y son más fáciles de detectar mientras que las rupturas de tubos

se pueden identificar por la caída de presión. En lugar de considerar tamaños o presiones, los detectores de fuga por ultrasonido está relacionado con la tasa de fuga.

Cuando la presión se mantiene constante una pequeña fuga tiene una tasa de fugas más pequeña y marca menos ultrasonido en comparación con una pérdida grande, ver figura 5.



Figura 5. Fugas a presión constante.

Detección de fugas de gas por ultrasonido es un medio muy eficaz de establecer la presencia de fugas de gas que es comúnmente utilizado en la industria química , plantas de energía , y numerosas aplicaciones de petróleo y gas. Cuenta con una tasa de respuesta rápida, no se ve afectada por ruido audible, y funciona especialmente bien en áreas abiertas, ventiladas donde otros métodos de detección de gas no son confiables.

2.4.6 Método de medición

No basta con solo conocer el principio de funcionamiento del ultrasonido, ni cómo opera nuestro equipo portátil; para llevar a cabo una inspección y detección de fugas de gas con éxito es necesario estar ampliamente capacitado y tener la experiencia necesaria en campo, para esto actualmente existen instituciones acreditadas para impartir y certificar a los inspectores que cumplan los requisitos de formación técnica ingenieril bajo los estándares de la organización de profesionales NDT (Non Destructive Testing - ensayos no destructivos), cumpliendo con la norma ASNT (American Society for Non Destructive Testing) Sociedad Americana de ensayos no destructivos, norma ASNT SNT-TC-1A bajo la práctica escrita UEQ-TC-1A.

El objetivo del método es determinar el número y tamaño de las fugas. Tener los datos de esta situación inicial, para luego reparar las fugas e incrementar la eficiencia de operación del sistema. La reparación de fugas es una operación sencilla y de bajo costo que debe ser parte del mantenimiento y rutina de toda planta industrial.

La lubricación correcta y el mantenimiento apropiado de las transmisiones, la limpieza y el reemplazo oportuno de los filtros de aire de succión son otras técnicas de mantenimiento que generan economías de energía.

Detección ultrasónica de fuga de gases es una técnica de detección relativamente reciente y ha surgido como una efectiva técnica para detectar fugas de gases. Se destaca de otras técnicas especialmente en zonas abiertas y ventiladas donde otros métodos de detección de fugas de gases no se pueden implementar debido a la rápida difusión en el ambiente debido la ventilación. Su gran diferenciación radica en que obedece a la misma fuente en sí de la fuga, en lugar de la concentración del gas por sí mismo, se complementan con métodos de monitoreo por sensores que miden la concentración de determinado gas en el ambiente.

El ajuste de presión debe hacerse un poco más alto que el correspondiente a las demandas del equipo, para compensar las caídas de presión que hubiere en las líneas de distribución. Las caídas de presión son proporcionales a la longitud de las líneas y al cuadrado de la velocidad frontal del gas que se mueve dentro de ellas.

Las pérdidas por fricción en el sistema pueden reducirse, colocando los compresores cerca de los puntos de consumo, aumentando el diámetro de las tuberías de distribución y eliminando fugas.

Conviene también examinar las posibilidades y las ventajas de instalar varios sistemas para varias presiones, ya que, por lo general, son pocos los equipos que demandan altas cantidades de aire.

Las uniones, los cambios de dirección y las variaciones de diámetro y de materiales son fuentes de pérdidas de presión en las tuberías, así que procure usar tramos rectos que reduzcan al mínimo los cambios de dirección o de diámetro. Seleccione el diámetro de tubería óptimo, aunque éste no sea igual a los diámetros de entrada y salida del sistema.

Los accesorios como válvulas, codos, uniones, reducciones, expansiones y filtros, son también fuente importante de pérdidas en las tuberías. Por eso debe usarse sólo los accesorios necesarios. Por ejemplo, si no se requiere ajustes finos, una válvula de compuerta produce menos pérdidas que una de globo.

La detección de gases en áreas ventiladas abiertas como instalaciones de petróleo y gas en alta mar o en tierra se considera generalmente problemático debido a que el gas se diluye fácilmente y se aleja de los sensores de gas convencionales, haciendo casi imposible su detección.

Los detectores de fugas de gas ultrasónicos resuelven este inconveniente. Cuando se produce un escape de gas, el ultrasonido generado por una fuga viaja a la velocidad de la luz, a través del el aire, desde la fuente de dicha fuga hasta el detector.

Dado que el nivel de presión sonora disminuye con la distancia a un ritmo predecible, los operadores y los ingenieros pueden establecer la cobertura de detección antes de que los detectores de fugas de gas ultrasónicos sean instalados. La ubicación y número de detectores puede ser planificado basado en los planos cuando la instalación se encuentra en la etapa de diseño.

Detectores de gas convencionales miden las concentraciones de gas en partes por millón (ppm). El rendimiento de los detectores de fugas de gas ultrasónicos se basa en la tasa de fuga, por lo general se mide en flujo másico o volumétrico por segundo.

Generalmente, se usa una sonda de escaneado estándar para localizar una fuga. Esta sonda contiene un transductor piezoeléctrico el cual, cuando se expone a presión de ultrasonido se flexa y produce una carga eléctrica. La sonda para escaneado puede complementarse con una sonda focalizadora de hule, cuya estrecha apertura facilita la localización exacta de la fuga de manera rápida.

En ocasiones la señal puede ser difícil de alcanzar o muy débil para detectar con sondas estándar. Se han desarrollado sondas especiales que ayudan a localizar fugas desde cierta distancia, y a detectar fugas de baja energía.

Para fugas fuera de rango, como aquellas que se emanan de fuentes que están muy arriba o muy lejos, se emplean platos parabólicos. Estas sondas enfocan los sonidos en un arreglo de transductores, donde se amplifica el sonido. Dependiendo de la forma y el tamaño de la parábola, el rango focal puede ser hasta 5 grados,

permitiendo la localización de fugas desde distancias mayores a 35 metros. Las fugas de bajo nivel, como las fugas de vacío en una columna de destilación, o las fugas en tuberías y accesorios bridados, pueden ser difíciles de localizar con módulos de escaneado convencionales. Se puede utilizar una sonda con una forma interna de “bocina” para escanear un sitio de este tipo. El débil sonido de la fuga se amplifica y llega a través de un cono recolector al transductor, permitiendo la identificación del sitio de la fuga.

El método generalizado para detectar fugas es sencillo. Un inspector con un instrumento de ultrasonido escanea un área y busca un sonido diferente que se acelera. Con ajustes continuos del control de volumen se sigue el sonido de la fuga hasta que se escucha el punto más alto. En el rango ultrasónico, el inspector es capaz de discriminar entre ruidos de fondo irrelevantes y la señal de la fuga. Algunos instrumentos incluyen una sonda focalizadora de hule que estrecha el área de recepción. Estas sondas protegen contra ultrasonidos competidores y ayudan a localizar la ubicación de fugas pequeñas.

La gran ventaja de la detección por ultrasonido es que puede usarse en diferentes ambientes, pues es sensible al sonido y no específica para cada gas. Cuando ocurre una fuga, el fluido (líquido o gas) se mueve desde el lado de alta presión a través del agujero al lado de baja presión de la fuga, donde se expande rápidamente y produce un flujo turbulento. Esta turbulencia tiene fuertes componentes ultrasónicos que son detectados por el instrumento. La intensidad de la señal de ultrasonido cae rápidamente desde la fuente, lo cual permite localizar exactamente el sitio de la fuga. Para sistemas fuera de servicio, una prueba especializada, denominada una prueba de tono, emplea un transmisor ultrasónico para producir una fuente de sonidos ultrasónicos. La prueba se lleva a cabo colocando un transmisor adentro, o en un lado de la pieza del equipo a inspeccionar. Una señal vibratoria viaja por toda la pieza y penetra cualquier sitio de fuga existente. Un escaneado para penetración sónica usa

un instrumento de ultrasonido y localiza la fuga. Esta prueba es especialmente apta para intercambiadores de calor.

2.4.7 Procesamiento y cuantificación de la fuga

El procesamiento de la señal interna se lleva a cabo mediante un proceso con patentes pendientes adicionales en este caso por la Empresa Norteamericana Ue Systems. Este circuito asegura la reducción de ruido, una verdadera traducción de frecuencias ultrasónicas, y las mayores lecturas precisas y consistentes disponibles.

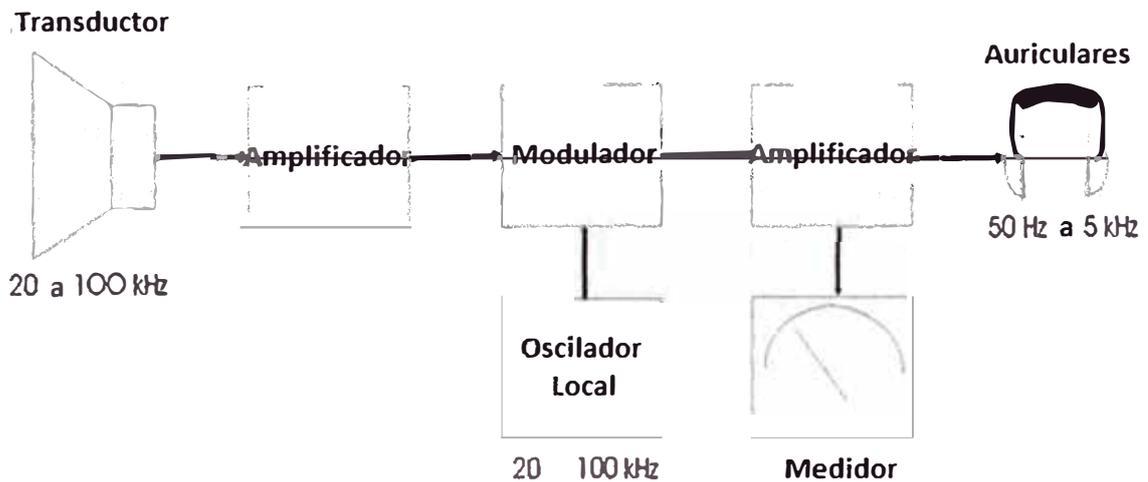


Figura 6. Esquema de un sistema detector de ultrasonido

El Transductor en términos generales convierte energía de una forma de energía en otra. Por ejemplo: energía eléctrica en energía mecánica o energía mecánica en energía eléctrica.

A pesar que el mismo transductor puede ser utilizado para emitir o recibir ultrasonido, en ultrasonido propagado en aire el transductor solo recibe ultrasonido.

El ultrasonido recibido hace presión en el transductor específicamente en una pieza cerámica tratada con propiedad intrínseca de emitir una señal eléctrica al cambio de presión, el sonido es amplificado y luego heterodinado.

Hay cuatro frecuencias resultantes: la frecuencia original de fuga ultrasónica, frecuencia original de oscilador, suma de estas dos frecuencias; diferencia entre las dos frecuencias de señal originales de la fuga y del oscilador.

El principio heterodino es usado para convertir las frecuencias ultrasónicas a un nivel adecuado audible para los humanos. En el proceso heterodino, la señal audible es una traducción directa de la señal original. Usamos el mismo principio heterodino que se usa en la transmisión y recepción de radio AM. Por lo tanto, la señal de salida del audífono no es una señal dividida donde se puede multiplicar la frecuencia de audio por un número y terminar con la frecuencia ultrasónica. En el proceso heterodino, la señal ultrasónica de entrante es mezclada con una señal interna del oscilador y la diferencia es amplificada y entonces enviada a la salida del audífono y al circuito medidor.

El propósito del transductor en ultrasonido propagado en aire es recibir ultrasonido exterior y no transmitir ultrasonido. El proceso de recibir ultrasonido propagado en aire o estructura envuelve el uso de transductores piezoeléctricos.

Piezolectricidad es “presión electricidad”, el cristal bajo presión desarrolla una carga eléctrica. Cuando ella onda de ultrasonido impacta el cristal ocasiona que se flexione y produzca energía eléctrica.

Los tres materiales de cristales para transductores son cuarzo, sulfato de litio y cerámicas polarizadas. Los transductores piezoeléctricos generan cargas eléctricas cuando son sujetos a vibraciones mecánicas, y generan vibraciones mecánicas cuando son sujetos a pulsos eléctricos. Estos materiales cerámicos son polarizados sinterizados y calentados a aproximadamente 1000 °C y polarizados aplicando un voltaje directo de unos cuantos miles de voltios por centímetro de espesor. El proceso de polarización hace que estos materiales sean piezoeléctricos.

Una vez recolectadas las mediciones realizadas en campo se procede a su descarga al software Ultratrend DMS, en el apéndice se describe paso a paso este proceso de descarga de datos.

III. ESTUDIO TÉCNICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA LÍNEA DE AIRE COMPRIMIDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ULTRASONIDO ACÚSTICO APLICADO EN UNA PLANTA PAPELERA

3.1 Objetivos

- Identificar las fugas en el sistema de aire comprimido.
- Eliminar pérdidas y mejorar la eficiencia en el transporte del aire comprimido desde el punto de generación hasta los puntos de consumo.
- Cuantificar la cantidad de aire comprimido que se está perdiendo del sistema por las fugas.
- Determinar el costo de operación que se pierde debido a las fugas.
- Reparar las fugas y evaluar las pérdidas en dolares del aire comprimido, oportunidad de ahorro operativo.

3.2 Inspección de la línea de aire comprimido por ultrasonido acústico

En planta se procedió a realizar la inspección de toda la línea de aire comprimido desde el cuarto de compresores hasta los puntos de consumo, obteniéndose el estado inicial del sistema de aire comprimido en cuanto al número de fugas presentes, luego se repararon las fugas y se realizó una inspección adicional nuevamente a toda la línea con especial énfasis a los puntos reparados.

3.2.1 Datos de los compresores

Para la generación del aire comprimido la planta emplea 3 compresores, cuyas características son:

- Marca: Atlas Copco

- Modelo : GA22VSD
- Presión máx. : 13 bar - 189 psi - 1.3 MPa
- Caudal : 60 l/s – 127,13 cfm - 3,6 m³/min
- Voltage : 380 V - 60 Hz
- P_{MOTOR} : 22 kw - 30 hp
- n_{MOTOR} : 6000 rpm



Figura 7. Compresores

La figura 7 muestra dos de los tres compresores de iguales características empleados en planta que alimentan toda la línea de aire comprimido.

2 tanques Presurizado LOHENNER GmbH & Co. Kg

- Modelo : 57223 Krenztal 0049/2732/58 52-0
- Contenido : Aire Comprimido
- Capacidad : 3000 L
- Presión max. : 16 bar
- Presión min. : 0 bar

- Temperatura max. : +50 °C
- Temperatura min. : -10 °C
- Fecha de fabricación : 2008
- Serie : 92033

3.2.2 Equipos Utilizados

Para el análisis se utilizó un sistema de inspección ultrasónico propagado en aire y estructuras ULTRAPROBE 15000KT, con las siguientes características.

Tabla 2. Especificaciones del equipo de ultrasonido.

Circuitos Internos	De estado sólido analógico y circuito digitales SMD con compensación de temperatura y conversión RMS.
Rango de frecuencia	20 kHz a 100 kHz
Tiempo de respuesta	Menor a 10 milisegundos.
Tipo de sondas	Escáner trisónico.
Audífonos	23 dB de atenuación de ruido.
Sensibilidad	Detecta 0.005" (0.127 mm) de diámetro de fuga y 5 psi (0.34 bar) de presión a una distancia de 50 pies (15.24 m)
Temperatura de operación	0 °C a 50 °C

- Software Ultratrend DMS 5.2 marca Ue Systems.
- Software UE Spectralyzer 4.2 marca Ue Systems.

La tabla 2 describe las características técnicas del equipo de ultrasonido empleado para la detección de fugas, también se muestra el nombre de los softwares los cuales son utilizados en la cuantificación de las fugas.

3.3 Resultados de la inspección

En este punto de muestra los resultados in situ de la inspección en planta con el posterior análisis y con los resultados finales.

3.3.1 En planta.

Antes de realizar cualquier medición ultrasónica es necesario comprobar la calidad de las mediciones realizadas por el equipo. Para eso se realiza una serie de pruebas las cuales validan las mediciones.

La validación consiste en colocar un generador de pulsos de ultrasonido a una frecuencia de 40 kHz. Se coloca el instrumento de medición con una sonda de tipo escaneo trisónico a una distancia de 27,5 cm, se ajusta el nivel de sensibilidad a 20 y se toma la medición.

Una vez realizado este procedimiento (ASTM E-1002-2005) se cambia el tipo de sonda del instrumento y se coloca el estetoscopio, se realiza un contacto con el generador de pulsos ultrasónicos y se toma la medición.

Estas mediciones se comparan con las realizadas en el registro del instrumento y deben de coincidir. De no ser así el instrumento deberá de volver a certificar su calibración.

Para fines del protocolo de validación, se hace uso de los siguientes instrumentos:

- Equipo de inspección de ultrasonido acústico UP 15000 marca Ue Systems.
- Módulo de escaneo trisónico.
- Generador de tonos.

A continuación se detalla en la Tabla 3 los resultados del protocolo de validación de sensibilidad.

Tabla 3. Resultado de protocolo de validación

Módulo	N° Serie	Distancia (cm)	Generador de tonos	Sensibilidad	Frecuencia kHz	dB
SCM	102225	27.5	Alto	20	40	96
STM	10225	27.5	Alto	20	20	46

En Planta se realizó la inspección de detección de fugas, siguiendo los protocolos para habilitación del personal en conjunto con un personal interno cumpliéndose todas las normas de seguridad con el uso correcto de los equipos de protección personal necesarios.

En la inspección se detectaron fugas en dos sectores de la planta, en los cuartos de compresores y en el área de manufactura, las fugas fueron identificadas y rotuladas mediante una etiqueta colocada por el mismo personal de planta en cada punto de fuga, fueron en total 27 fugas determinadas y almacenadas las lecturas en el equipo de campo.

3.3.2 Descarga de datos y post procesamiento de la información.

Una vez con los datos recogidos de planta, se procedió al trabajo de la descarga de los datos al software Ultratrend DMS y Spectralyzer ambos desarrollados por la empresa Norte Americana Ue Systems Inc.

Con la descarga de la información al software una vez completa se procede a la cuantificación de cada fuga y la cantidad de aire a presión que se está perdiendo en la sumatoria de las fugas.

3.3.3 Cuantificación del flujo de aire perdido en fugas.

De manera general se explicará el proceso de cuantificación volumétrica de fugas. Existen dos escenarios para que ocurra una fuga, y esta puede ser hacia un recipiente, o hacia la atmósfera. Dependiendo del medio de propagación es el tipo de sonda a considerar.

Si la fuga es hacia la atmosfera nos encontramos con una onda esférica la cual se propagará en todas direcciones con igual magnitud.

Este tipo de fuga tiene un decremento en tendencia logarítmica. Esta forma de fuga es fácil de obtener en base a la razón de fuga “K” la cual es inversamente proporcional a la distancia de atenuación de una onda esférica ultrasónica.

$$\psi(\sigma) = K \cdot \sigma \quad (13)$$

En donde:

$\psi(\sigma)$: Es el flujo másico de la fuga

K: Es la razón de la fuga

σ : Distancia de atenuación de la onda de ultrasonido

Para el cálculo de la distancia de atenuación de la onda de ultrasonido es necesario establecer el origen de la fuga (se conoce como σ_{MIN} - propiedad intelectual de Ue Systems).

El cálculo de σ_{MAX} se realiza mediante un modelo matemático que decrece a razón no-uniforme, a esta razón de decremento se conoce como coeficiente de atenuación.

$$\alpha = \Delta\alpha \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (14)$$

En donde:

$\Delta\alpha$: Razón de cambio del muestreo

Δx : Razón de cambio de distancias

α : Coeficiente de atenuación

El cálculo de σ_{MAX} se realiza mediante un proceso iterativo el cual calcula la distancia en donde la amplitud de la onda encuentre un valor cercano a cero.

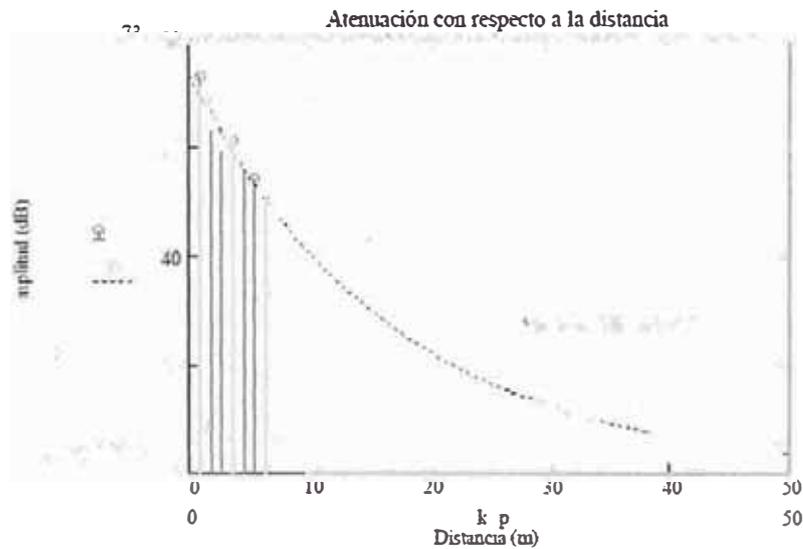


Figura 8. Modelo matemático de atenuación de la intensidad de ultrasonido.

La figura 8 muestra el comportamiento del nivel de ultrasonido (amplitud) en decibels con respecto a la distancia medida desde la fuente de fuga.

Para justificar el modelo se comparó con la ecuación de la onda y se realizó una gráfica comparativa:

$$Y(x, t) = Y_i * \text{Sen}(\xi * x - v * t) \quad (15)$$

Y_i : Amplitud de la onda

ξ : número de onda

x : distancia

v : velocidad

t : tiempo

La Ecuación 3 nos representa el nivel de amplitud en función del tiempo y la distancia, su visualización con respecto al modelo matemático se aprecia en la siguiente figura.

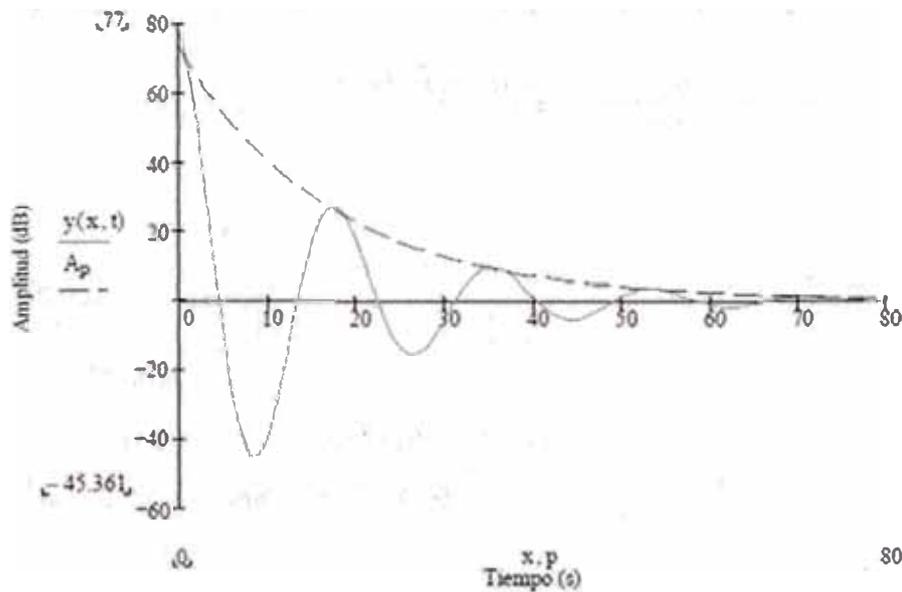


Figura 9. Atenuación natural de la onda

La figura 9 muestra la atenuación (disminución de la amplitud) de la onda en función con el tiempo.

3.3.4 Cuantificación de costos de las fugas.

El costo de la energía para generar la cantidad de aire comprimido necesario en planta depende de los siguientes parámetros:

- Potencia de compresor.
- El tiempo a operación.
- Costo de la energía (tarifario de contrato)
- Eficiencia del motor
- Porcentaje del tiempo de operación del compresor por año.

Cálculo de costo de energía para Generar el aire comprimido, en base anual.

$$\text{Costo anual} = \frac{\text{Pot. X tiempo operación X costo energía X \% operacion}}{\eta \text{ motor}} \quad (16)$$

Dónde:

- Potencia (kW)
- Tiempo de operación (horas/año)
- Costo de energía (\$/kWh)

Para el caso de estudio los datos del compresor fueron:

Marca: Atlas Copco

Modelo: GA30VSD

Presión máx.: 13 bar - 189 psi - 1.3 MPa

Caudal: 60 l/s - 127,13 cfm - 3,6 m³/min

Voltaje: 380 V - 60 Hz

P_{MOTOR}: 30 kW - 40 hp

Datos adicionales:

- El compresor es retirado de línea por motivos de mantenimiento preventivo y parada de las líneas de producción unos 14 días por año, por lo tanto trabaja 351 días/año.
- La planta produce en 3 turnos de 8 horas, y la disponibilidad de los compresores al 100% de su carga de trabajo es de 0.85.

Entonces tenemos los siguientes datos para ser reemplazado en nuestra fórmula:

- Potencia: 30 kW
- Tiempo de operación: 8424 horas/año
- Costo de energía: 0,06\$/kWh
- % Operación: 85%
- Eficiencia motor: 75%

Aplicando la Ecuación 4 para los 3 compresores, el total de costo de energía para generar el aire comprimido para la planta es: **51554,88 \$/año**.

La tabla 4 muestra el total de fugas encontradas en la situación inicial de la planta, fueron en total 27 fugas localizadas sobre todo en elementos conectores haciendo un total de 74, 1 cfm, representado un gasto anual de \$12314.27.

Estos resultados fueron entregados a la gerencia de operaciones y se generaron las ordenes de trabajo necesarias para reparar las fugas, las cuales consistieron en

Tabla 4. Fugas detectadas y cuantificadas por la inspección inicial en planta.

Fuga N°	ID equipo	Descripción de la fuga	Nivel de sonido		Costo Anual
			(dB)	CFM	\$
1	f-1(filtro #1)	junta de válvula de salida	33	1.9	311.5
2	f-1(filtro #1)	junta de válvula de entrada	42	2.6	436.7
3	f-3(filtro #3)	junta de válvula de salida	39	2.4	393.7
4	f-3(filtro #3)	junta de válvula de entrada	55	3.8	637.1
5	dryer #3	válvula defectuosa	40	2.5	407.9
6	dryer #3	válvula defectuosa	55	3.8	637.1
7	valvula 41	rosca de "T" después de la válvula	62	4.5	753.5
8	room 206	columna del cas #19 en conector	39	2.4	393.7
9	room 205	quick conector entrada cas #18	42	2.6	436.7
10	room 205	quick conector salida cas #18	34	2	324.9
11	room 205	conector 1 columna que alimenta cas #18	53	3.6	604.9
12	room 205	conector 2 columna que alimenta cas #18	30	1.6	272.6
13	room 204	codo salida cas #17	37	2.2	365.7
14	room 204	codo entrada cas #17	54	3.7	620.9
15	room 204	conector que sale de válvula del plafón	35	2	338.3
16	room 204	tubing suelto dentro del plafón	34	2	324.9
17	room 203	conector cas #209	63	4.6	770.5
18	room 203	codo después de filtro entrada cas #16	55	3.8	637.1
19	room 218 b	unión universal de filtro cas #210	45	2.9	481.0
20	room 218 b	bushing de válvula cas #212	38	2.3	379.6
21	room 218 b	tornillos de junta en válvula fcv 212	42	2.6	436.7
22	room 214	codo antes de filtro cas #224	31	1.7	285.4
23	room 214	rosca de conexión para instrumentación	46	3	496.0
24	room 215	rosca de conexión cas #225	32	1.8	298.4
25	room 215	rosca que sale de codo a filtro cas #225	40	2.5	407.9
26	room 217	pistola de aire cas #226	46	3	496.0
27	room 217	codo salida cas #226	37	2.2	365.7
Costo Anual Total (\$)					12314.3

Tabla 5. Condición del sistema luego de la reparación de fugas.

Fuga N°	ID equipo	Descripción de la fuga	Nivel de sonido (dB)	CFM	Costo Anual (\$)
1	f-1(filtro #1)	junta de válvula de salida	4	0.1	16.22
2	f-1(filtro #1)	junta de válvula de entrada	0	0	0
3	f-3(filtro #3)	junta de válvula de salida	3	0.1	10.84
4	f-3(filtro #3)	junta de válvula de entrada	0	0	0
5	dryer #3	válvula defectuosa	0	0	0
6	dryer #3	válvula defectuosa	0	0	0
7	válvula bv-41	rosca de "t" después de la válvula	0	0	0
8	room 206	columna suplido del cas #19 en conector	0	0	0
9	room 205	quick conector entrada cas #18	4	0.1	16.22
10	room 205	quick conector salida cas #18	4	0.1	16.22
11	room 205	conector 1 columna que alimenta cas #18	0	0	0
12	room 205	conector 2 columna que alimenta cas #18	0	0	0
13	room 204	codo salida cas #17	37	2.2	365.68
14	room 204	codo entrada cas #17	54	3.7	620.92
15	room 204	conector que sale de válvula del plafón	35	2	338.3
16	room 204	tubing suelto dentro del plafón	34	2	324.85
17	room 203	conector cas #209	0	0	0
18	room 203	codo después de filtro entrada cas #16	0	0	0
19	room 218 b	unión universal de filtro cas #210	0	0	0
20	room 218 b	bushing de válvula cas #212	2	0	6.15
21	room 218 b	tornillos de junta en válvula (fcv 212	0	0	0
22	room 214	codo antes de filtro cas #224	31	1.7	285.43
23	room 214	rosca de conexión para instrumentación	46	3	496.04
24	room 215	rosca de conexión cas #225	0	0	0
25	room 215	rosca que sale de codo a filtro cas #225	0	0	0
26	room 217	pistola de aire cas #226	0	0	0
27	room 217	codo salida cas #226	0	0	0
				Costo Anual Total (\$)	2496.88

cambios de los elementos defectuosos por nuevos o simplemente el cambio de la empaquetadura que sella el sistema por un nuevo empaque. Por razones de operación de la planta no se pudo hacer las reparaciones en las áreas denominadas room 204 y room 214.

Luego de haber reparado las fugas se procedió a realizar una nueva inspección a todo el sistema, incidiendo de manera puntual en aquellos puntos etiquetados como reparados, aun persistiendo 11 fugas.

La tabla 5 de la página anterior muestra la condición de la planta luego de haber reparado las fugas de 27 fugas en total se logró disminuir a 11.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pérdidas de volumen por fugas ascienden a 74,1 pies cúbicos por minuto de aire comprimido liberado al ambiente, disminuyendo de manera directamente la eficiencia del sistema ya que esto representa el 23.89% del volumen generado.

$$\text{Eficiencia del sistema} = \frac{\text{aire comprimido generado} - \text{fugas}}{\text{aire comprimido generado}} \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{Aire comprimido generado} = 3 * 127,13 * 0,96 * 0,85 = 311,21 \text{ CFM}$$

$$\text{Fugas} = 74,1 \text{ CFM}$$

$$\text{Eficiencia del sistema} = 76,2\%$$

El costo de esta deficiencia es una pérdida de \$ 12314.27 anuales en fugas al medioambiente.

Luego de haber realizado la inspección en planta, los resultados nos arrojan una disminución notoria en las pérdidas de volumen por fugas desde 74,1 CFM a 15 CFM de aire comprimido liberado al ambiente, aumentando la eficiencia del sistema según los cálculos de un 76,2 % a una eficiencia mayor al 95%.

$$\text{Eficiencia del sistema} = \frac{\text{aire comprimido generado} - \text{fugas}}{\text{aire comprimido generado}} \times 100\% \quad (18)$$

$$\text{Aire comprimido generado} = 3 * 127,13 * 0,96 * 0,85 = 311,21 \text{ CFM}$$

$$\text{Fugas} = 15 \text{ CFM}$$

$$\text{Eficiencia del sistema} = 95,18\%$$

Con esta mejora va asociada un ahorro de costos, ya que inicialmente se perdía en fugas \$ 12314.27 anuales, y actualmente esto se redujo a \$2496,88 anuales, dando un ahorro significativo de \$9817.39 anual.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones:

1. El método permitió detectar inicialmente 27 fugas de las cuales fueron reparadas mas del 50% quedando luego de una segunda inspección solo 11 fugas remanentes, las cuales no se llegaron a reparar por estar trabajando la línea de producción, con esto se concluye la practicidad y viabilidad del método para la detección de las fugas, su cuantificación volumétrica, la data registrada, la trazabilidad y cálculo de pérdida económica generada por las fugas.
2. Se mejoró la eficiencia de la línea de aire comprimido del 76,2% al 95,2%.
3. Las reparaciones de las fugas identificadas a través de este método significaron un ahorro de \$9817,39 anuales para la compañía.

4.2 Recomendaciones:

1. En varios tramos de la línea no se indica el sentido del flujo del aire comprimido, se recomienda señalar estas direcciones para futuras inspecciones.
2. Efectuar cambios periódicos del teflón y empaquetaduras cuando se realiza el mantenimiento a los componentes y/o inspeccionar el estado de las soldaduras.
3. Seguir con las mediciones de ultrasonido para evaluar cambios en la tendencia.
4. Se determinó la existencia de la mala práctica operativa por parte de los operadores en el sistema de limpieza de los equipos del área de Envasado, ya que estos utilizan el aire comprimido para fines personales de limpieza y secado, lo que trae un desperdicio de 8 m³/h por cada manguera de ¾" abierta según Manual de Aplicaciones del Aire Comprimido Atlas Copco.
5. Dar cursos de concientización al personal de operadores de la Planta, sobre el costo de la energía utilizada en la compresión del Aire.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Alonso J., Evaluación del sistema de aire comprimido para el mejoramiento del consumo energético de una planta cervecera, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, UDO, Puerto La Cruz, (2007).
- 2 Departamento de Comunicaciones de Atlas Copco, Aire comprimido y su aplicación en la industria, 3º Edición, (1990).
- 3 Fernández P., Compresores, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. (2002).
- 4 NORMA ASTM-E-1002-05 – Standard Test Method for Leaks Using Ultrasonics, 2005.
- 5 Guia Norgren para el tratamiento del aire comprimido, Suecia (2009).
- 6 Manual de curso de certificación Para inspecciones de fugas por ultrasonido, práctica escrita UEQ-TC-1A, Ue Systems, Elmsford New York (1997).
- 7 Studor G., Ultrasonic Dtector in Space, Jhon Space Center/Structural Engineering Division, 2002.
- 8 Bandes A., Ultrasonic Condioting Monitoring, UE Systems, Inc ©2009.
- 9 <http://dc387.4shared.com/doc/ENb5kLpf/preview.html> (octubre 2012).
- 10 HSE website, April 2010: <http://www.hse.gov.uk/RESEARCH/otopdf/2001/oto01055.pdf>; page 10

APÉNDICE

APENDICE A: Descarga de datos y cuantificación de fugas en software Ultratrend.

Una vez recolectadas las mediciones en campo se procede a su descarga al software Ultratrend, el procedimiento se describe a continuación:

Creación de una planta, en la pestaña archivo se selecciona la opción nueva planta, la planta es creada con éxito.

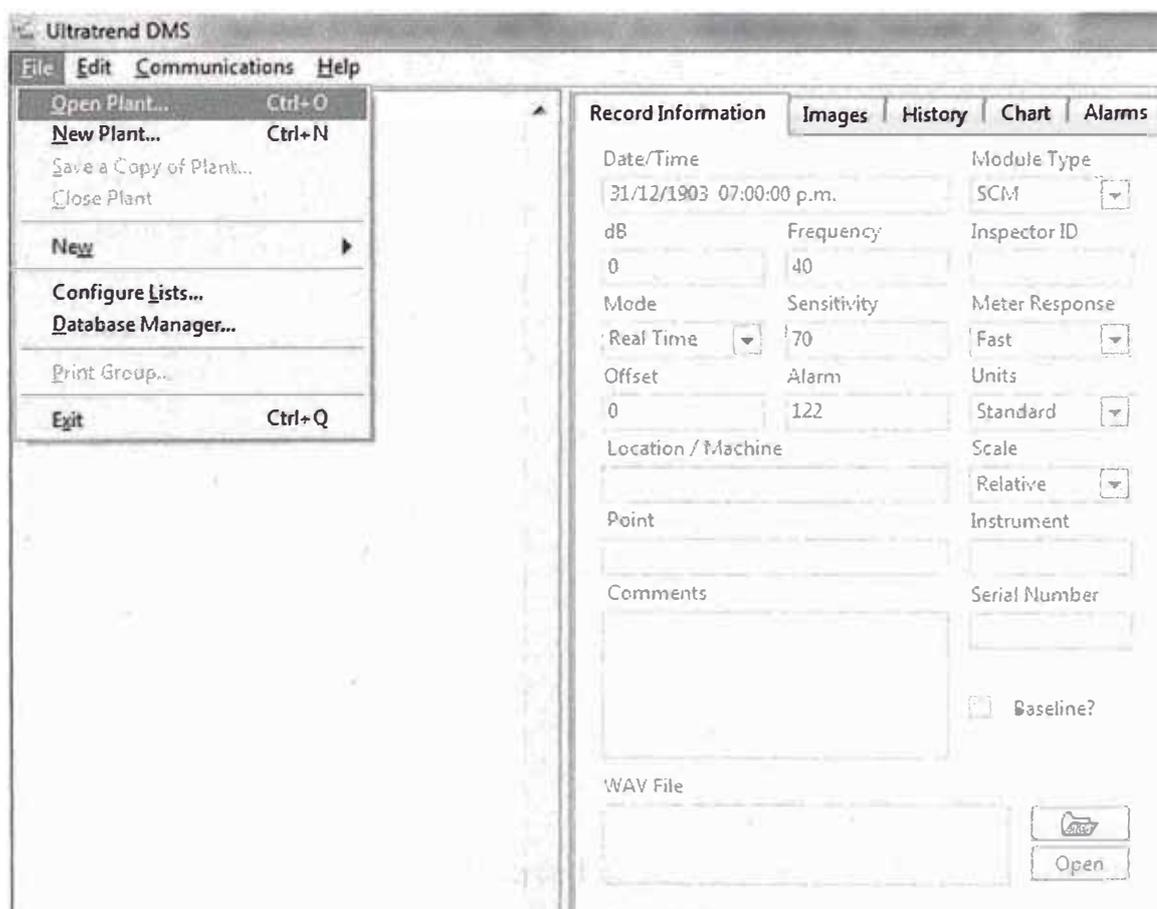


Figura 10. Creación de la planta en el software Ultratrend.

La figura 10, muestra la creación de una nueva planta en el software mediante la selección en el menú despegable File, de la opción New Plant.

En el siguiente paso se crea los datos del lugar donde se realizó la inspección, luego de seleccionar el tipo de aplicación y luego de haber completado los datos se confirma la opción siguiente.

New Plant Wizard

Plant Name
Papelera

Application Type
Leak

Group Name
Compresores

DMS Plants Folder
CADMS Plants

Descriptor Format

13/3 Format
Location (or machine) descriptors are set to have a maximum of 13 characters. Records (or point) descriptors are limited to 3 characters.

8/8 Format
Both location (or machine) and records (or points) descriptors are limited to 8 characters.

Next Cancel

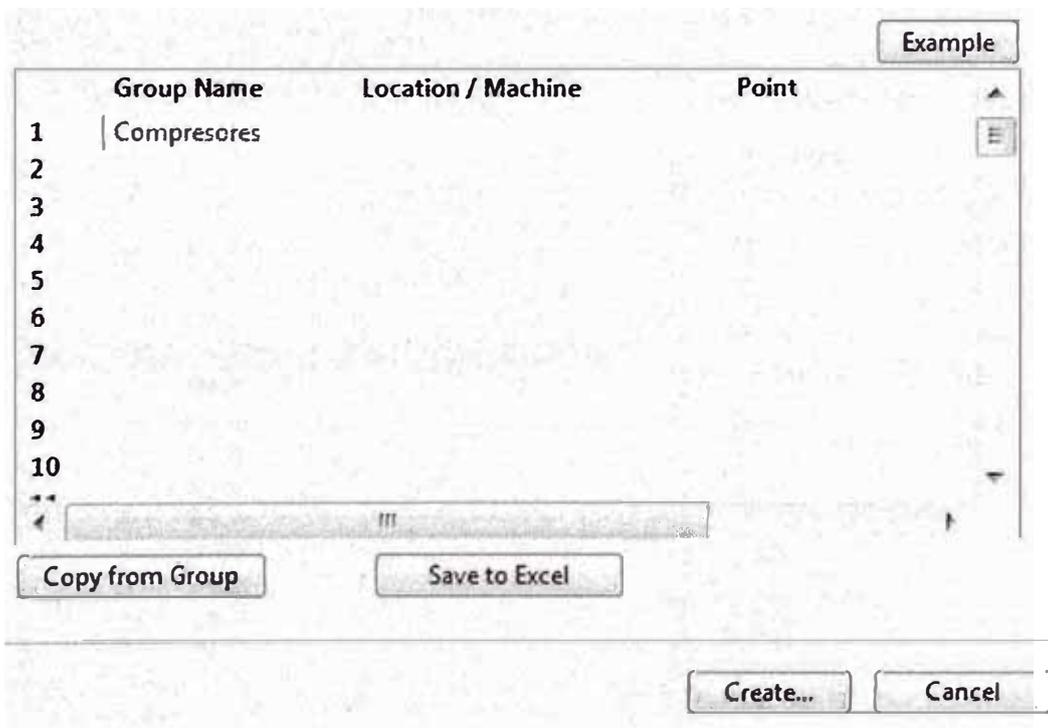
Figura 11. Creación de los lugares de inspección.

La figura 11 muestra el recuadro para llenar ciertos campos como: nombre de la planta donde se realizó la inspección, para que tipo de aplicación estamos utilizando el software, y el grupo o área de la planta inspeccionada.

En el siguiente paso confirmamos y tendremos la planta con los lugares de inspección creados.

Create Group

Please use the table to layout this group, and click Create when finished.



	Group Name	Location / Machine	Point
1	Compresores		
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

Buttons: Copy from Group, Save to Excel, Create..., Cancel

Figura 12. Planta y lugares de inspección en el software.

La figura 12 muestra la creación del área de la planta donde se realizaron las inspecciones.

Luego de haber seleccionado la pestaña comunicaciones se desprendera y se selecciona la opción cargar grupo.

La figura 13 muestra la ventana del software con la pestaña de comunicaciones seleccionada para descargar los datos correlacionados en el software. En este paso el software automáticamente procederá a descargar las grabaciones.

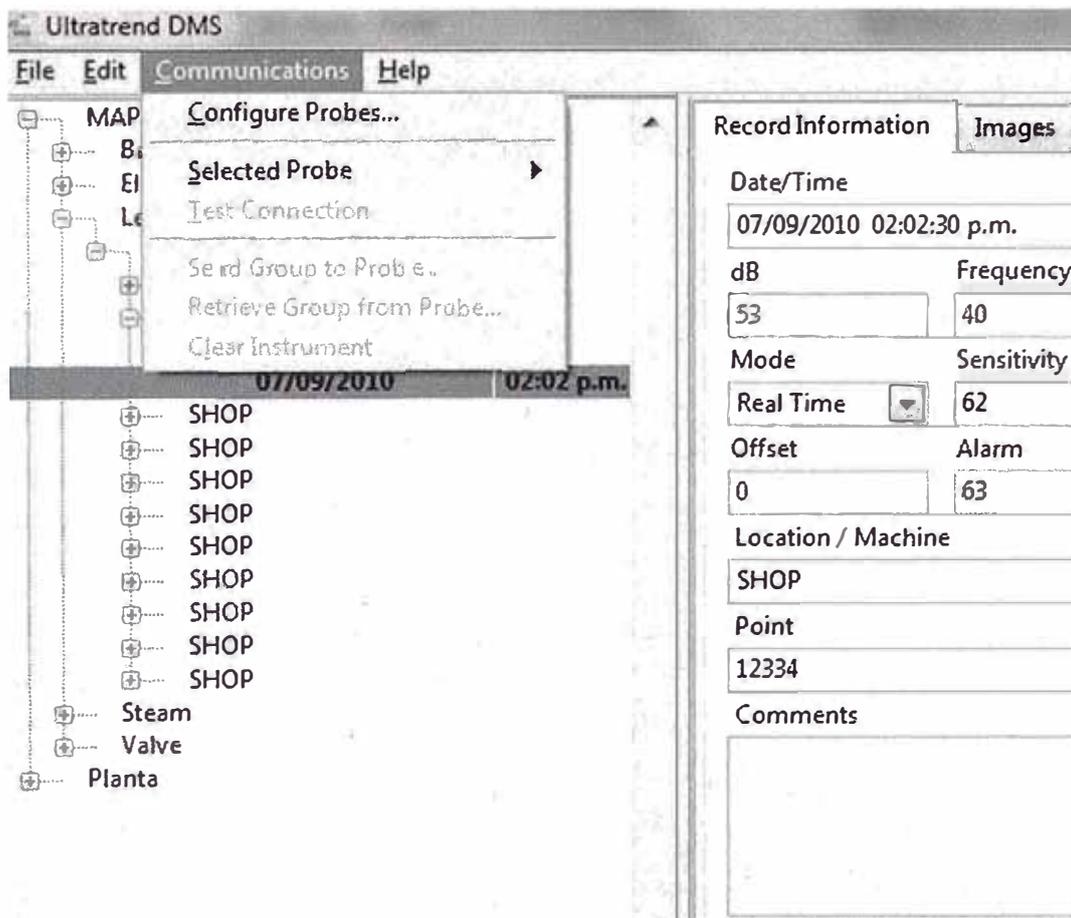


Figura 13. Seleccionar comunicaciones y crear grupo.

La figura 14 muestra el proceso de la tarea de descarga de datos, todos los datos almacenados en planta son ahora descargados al software para su correspondiente análisis.

Una vez ya descargados todos los datos al software estamos listos para crear reportes y cuantificar las fugas, estableciendo las condiciones de operación de la planta. En este paso es donde seleccionaremos la aplicación que estamos utilizando en este caso fueron fugas de aire comprimido.

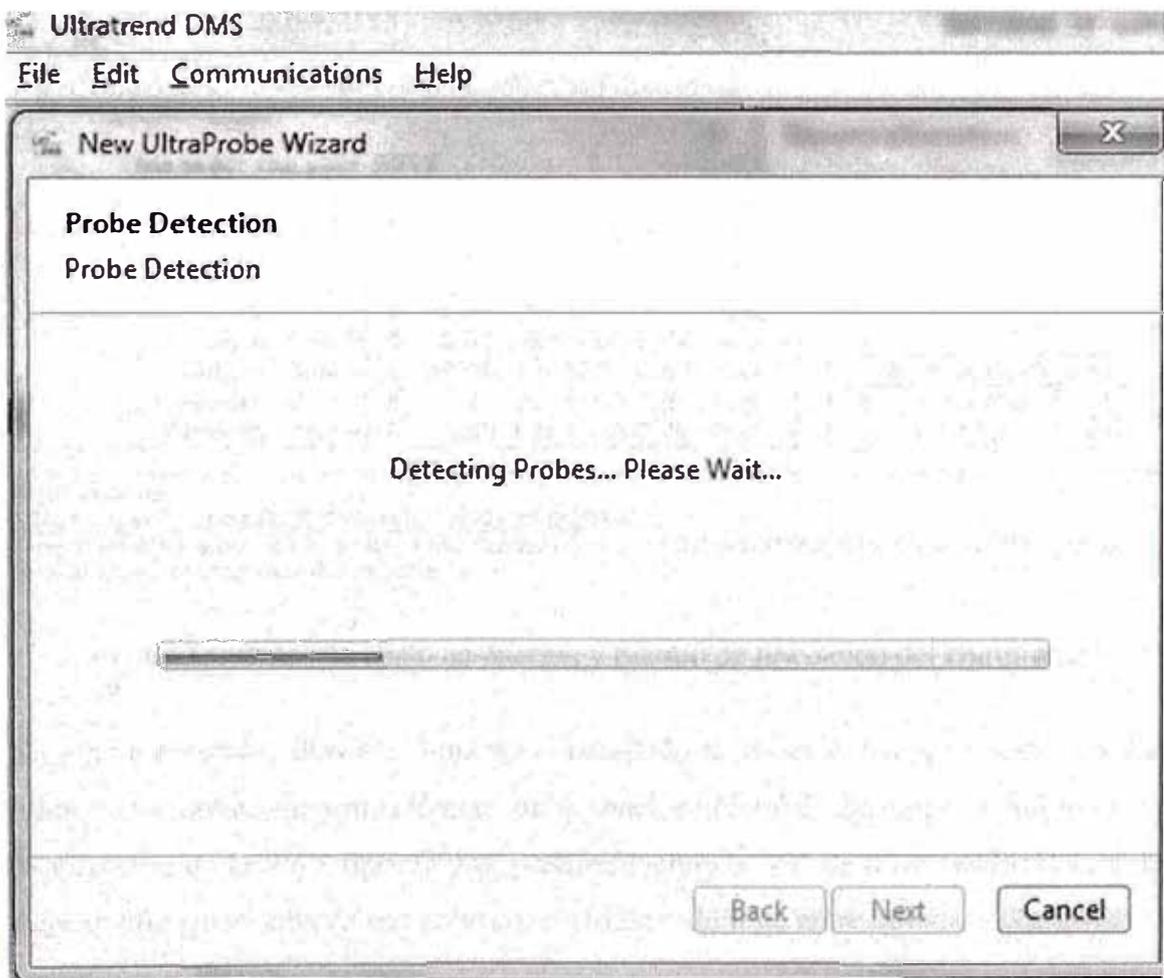


Figura 14. Descarga de los datos al programa.

Es aquí donde vamos a poder variar la presión en línea, donde también podemos introducir la ubicación en el punto exacto de la fuga, lugar inspeccionado tipo de gas, costo del kWh consumido, información de operación de los compresores, y algunos datos adicionales ya explicados. entre otros.

La figura 15 muestra la primera hoja del reporte generado en Excel donde debemos introducir los datos de operación del compresor y el costo de energía.

		Copyright 2008 by UE Systems Inc. Patent Pending.	
This is for the year 2012			
Cost Calculations			
State =		New York	
Electricity Cost =	\$	0.05	Per kWh
Air Cost =	\$	0.33	Per 1000 Cubic Feet
Argon Cost =	\$	2.80	Per 1000 Cubic Feet
Helium Cost =	\$	59.95	Per 1000 Cubic Feet
Hydrogen Cost =	\$	11.77	Per 1000 Cubic Feet
Nitrogen Cost =	\$	3.80	Per 1000 Cubic Feet
Operational Times			
Hours Per Day		24	
Days Per Year		351	
Instructions: Save a blank copy of this spreadsheet to use next year. The <i>Cost</i> Worksheet Tab is used to enter the year this spreadsheet is for and for the cost of the gases. In Cell C2 enter what year this sheet is for.			

Figura 15. Datos de costo de energía y tiempo de operación del compresor

Se genera el reporte donde se muestra el resultado de los cálculos presentados en una tabla cuyas columnas son: Número de grabación, Nombre de grupo, nombre de la localización de la fuga, tipo de gas, presión, lectura en dB de ultrasonido, la tasa de fuga en cfm (pies cúbicos por minuto), costo de cada fuga entre otros.



Copyright 2008 by UE Systems Inc. Patent Pending.

Octubre 2012									
	Air Leaks Repaired		Argon Leaks Repaired		Am Leaks Repaired	Nitrogen Leaks Repaired		Cost Avoidance	
	CFM	Cost	CFM	Cost	CFM	CFM	Cost	Identified	Repaired
	0.0	\$0.00	0.0	\$0.00	0.0	0.0	\$0.00	\$12,314.27	\$0.00
Record Number	Group Name	Location Name	Type of Gas	Pressure at Leak	dB Reading	Repaired (Y/N)	Work Order Schedule #	Identified leaks Cost Avoidance	Size of Leak CFM
1	Compresores	COMPRESS	Air	100	33			\$311.54	1.9
2	Compresores	COMPRESS	Air	100	42			\$436.71	2.6
3	Compresores	COMPRESS	Air	100	39			\$393.66	2.4
4	Compresores	COMPRESS	Air	100	55			\$637.09	3.8
5	Compresores	COMPRESS	Air	100	40			\$407.87	2.5
6	Compresores	COMPRESS	Air	100	55			\$637.09	3.8
7	Compresores	COMPRESS	Air	100	62			\$753.46	4.5

Figura 16. Reporte exportado a Excel con todos los datos necesarios de la línea de aire comprimido.

La figura 16 muestra la hoja resumen del reporte generado donde nos muestra de manera ordenada las fugas y los datos de cada una de estas.