



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

**INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**"SELECCIÓN Y CÁLCULO DEL PAQUETE DE SECADO DE  
AIRE DE INSTRUMENTOS Y AIRE DE PLANTA PARA LA  
PLATAFORMA DE ENLACE E-KU-A2 DE PEMEX "**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

**MIGUEL ANGEL OLMOS CORDERO**

ASESOR:

**M. en I. ARQUÍMEDES SOLÍS TÉLLEZ**

MÉXICO-2010





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Estudios Superiores Aragón

## **DEDICATORIA**

*A mi esposa e hija, gracias por su apoyo,  
amor, comprensión y valor.*

*A mis padres, mi mayor ejemplo de dedicación,  
constancia y lucha.*

*A mi mis hermanos Paty, Mario y Juan.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios.

Al M. en I. Arquímedes Solís Téllez por su excelente orientación para el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Alberto, Al M. en I. Oscar Alfredo Godoy Marroquín por su valiosa ayuda, apoyo y tiempo dedicado.

A mis sinodales quienes dedicaron tiempo en la revisión de este documento y cuyos comentarios y opiniones fueron de gran ayuda.

A la gente del Instituto Mexicano del Petróleo que alguna u otra forma participó en este trabajo, aún sin saberlo.

A mis amigos y familia, por estar siempre.

---



---

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b>	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	ii
<b>CONTENIDO</b>	iii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	v
<b>CAPITULO 1 Conceptos generales</b>	<b>1</b>
1.1 CONCEPTOS GENERALES DEL PROYECTO	1
1.2 GASES	10
1.3 LEYES DE LOS GASES	11
1.4 EL AIRE	18
1.5 LA CONTAMINACIÓN EN EL AIRE COMPRIMIDO	19
<b>CAPITULO 2 Consideraciones generales del compresor de aire para instrumentos</b>	<b>25</b>
2.1 COMPRESORES	25
2.2 PROCESOS TERMODINÁMICOS DE LA COMPRESIÓN	32
2.3 COMPRESIÓN DEL AIRE	38
2.4 ECUACIONES PARA UN COMPRESOR RECIPROCANTE DE AIRE	40
<b>CAPITULO 3 Consideraciones generales del secador de aire para instrumentos</b>	<b>49</b>
3.1 PROCESOS DE SECADO	49
3.2 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DEL SECADOR	52
3.3 SECADO POR ADSORCIÓN	58
<b>CAPITULO 4 Selección y cálculo del paquete de aire de instrumentos</b>	<b>66</b>
4.1 CÁLCULO DEL COMPRESOR	67
4.2 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL SECADOR REGENERATIVO	70

<b>CAPITULO 5 Equipo auxiliar del paquete de aire de instrumentos</b>	<b>76</b>
5.1 COMPONENTES AUXILIARES DEL COMPRESOR	76
5.2 COMPONENTES AUXILIARES DEL SECADOR	88
5.3 EQUIPOS DE PROTECCIÓN Y CONTROL	90
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b>	

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la neumática constituye una herramienta muy importante dentro del control automático en la industria petrolera. Su acción no es tan rápida como la eléctrica, pero si es notablemente más rápida que la hidráulica, es empleado como un fluido de limpieza, refrigerante, elemento transportador, activador de herramientas neumáticas y de diversos sistemas de control.

El aire para instrumentos, que, es aire comprimido tomado del aire atmosférico, debe estar libre de humedad y partículas sólidas, contaminantes corrosivos y gases peligrosos, provenientes sobre todo de los procesos de pintado, limpieza química, purgas de equipo y se utiliza como medio de trabajo para accionar diversos dispositivos de control.

La calidad del aire comprimido para instrumentos (dispositivos de control) tanto en plataformas petroleras como en cualquier otro tipo de planta y proceso, desempeña un papel importante. El aire para instrumentos con mala calidad, contiene impurezas en forma de partículas de suciedad u óxido, residuos de aceite lubricante y humedad.

El aire de instrumentos de mala calidad da origen a averías y mal funcionamiento en las instalaciones neumáticas llegando a la destrucción de los elementos neumáticos.

Para la producción del aire comprimido se utilizan compresores, que elevan la presión del aire tomado del medio ambiente, al valor del trabajo deseado.

Tanto el agua (humedad) como los otros contaminantes llegan al interior de la red con el aire que aspira el compresor. La cantidad de humedad depende en primer lugar de la humedad relativa del aire, que a su vez depende de la temperatura del aire y de las condiciones climatológicas.

Dentro de las actividades que Petróleos Mexicanos lleva a cabo en instalaciones costa afuera (ambiente marino), está la del desarrollo de ingeniería de detalle, construcción, e instalación de la plataforma marina de enlace E-KU-A2.



La plataforma de enlace E-KU-A2, tiene la función de recibir toda la producción de crudo ó gas de un determinado número de plataformas de perforación y enviarlo a la plataforma de producción. Una vez procesado en esta última, regresa separado el crudo y el gas a la plataforma de enlace para que finalmente se envíe a tierra ó a una embarcación para su almacenamiento.

En dicha plataforma de enlace, existe la necesidad de contar con el suministro de aire seco, limpio, libre de aceite y partículas sólidas para su instrumentación, para lo cual es necesario disponer de un paquete de compresión y secado de aire.

El paquete de aire comprimido para instrumentos, consta ordinariamente de una planta de compresores, prefiltro, paquete de secado de aire, post filtro y el receptor de aire.

El aire para instrumentos generado en el paquete, llega a las instalaciones a través de tuberías.

Este trabajo nos refiere la necesidad del desarrollo de la ingeniería de un paquete de aire de instrumentos y planta para la plataforma enlace E-KU-A2 de PEMEX ubicada en la Sonda de Campeche, el cual suministrará el aire necesario y seco para la operación de instrumentos neumáticos y servicios que requieren de aire comprimido.

---

# 1 Conceptos Generales

En este capítulo se conocerán los detalles para el diseño de la plataforma de enlace E-KU-A2, en la cual se requiere un paquete de secado de aire de planta e instrumentos, así como la teoría básica del aire.

## 1.1 CONCEPTOS GENERALES DEL PROYECTO.

De acuerdo al plan estratégico de desarrollo del proyecto integral KU-MALOOB-ZAAP (PEMEX 2008) y con el fin de satisfacer la demanda y los compromisos de producción de aceite y gas, es necesario contar con la infraestructura apropiada para explotar y manejar la producción de los campos KU, MALOOB Y ZAAP localizados en la sonda de campeche.

Para el aprovechamiento del gas, es necesaria la construcción de una plataforma de enlace que incluya trabajos de instalación, interconexión y puesta en servicio de ductos y cabezales sobre cubierta, equipo de rectificación (SLUG CATCHER), para el manejo de las corrientes de gas amargo así como el arribo y salida del gas de bombeo neumático (B.N.)

En la actualidad, la producción de gas proviene de las plataformas KU-A de perforación KU-M, KU-I, KU-G, ZAAP-C, BACAB-A y KU-F.

Una vez que inicie la operación de la plataforma de Enlace E-KU-A2, recibirá el gas a través del SLUG CATCHER proveniente de la plataforma existente PP-KU-F y de la plataforma nueva a través de un gasoducto nuevo.

La plataforma PB-KU-S enviará la producción de gas de las plataformas PP-KU-S, PP-KU-G y PP-KU-I a través del oleogasoducto actual de PP-KU-G a PP-KU-A1, (cambio de servicio a gasoducto). Debido al incremento de

producción y con el fin de mejorar el transporte de gas, adicionalmente al gasoducto se empleará un gasoducto nuevo de PB-KU-S a E-KU-A2 (alimentación al SLUG CATCHER).

El centro de proceso KU-A comprimirá el gas en E-KU-A1, posteriormente en E-KU-A1 Y PB-KU-A2.

#### **1.1.1 Objetivos de la obra.**

Contar con una plataforma de enlace E-KU-A2, como punto de arribo de los ductos que transportan la producción de gas proveniente de las plataformas involucradas como se muestra en la Figura 1.1.

La plataforma de enlace tiene como función, concentrar las tuberías de recibo y envío de hidrocarburos, hacia y desde el complejo, con el objeto de lograr mayores grados de seguridad durante la operación.

Se deben diseñar e instalar los servicios auxiliares para la correcta operación de esta instalación donde se encuentra el equipo paquete de suministro de aire para instrumentos y de planta.

#### **1.1.2 Descripción general de la obra.**

Construcción de una plataforma (octópodo) de enlace que soporte ductos para el transporte de gas, necesarios para el desarrollo de la explotación de los campos del activo.

#### **1.1.3 Justificación e implicaciones de la obra.**

Es necesario contar con una plataforma nueva que soporte los ductos, equipos y servicios proyectados para el manejo de la producción de gas del campo KU esperada en el proyecto integral KU-MALOOB-ZAAP.

De no realizarse esta obra, no será posible la explotación y aprovechamiento de 126 *MMSCFD* de gas amargo

#### **1.1.4 Trabajos a realizar.**

Para el área de servicios auxiliares se requiere de equipo para suministro de aire de planta y de instrumentos.

---

La plataforma de enlace E-KU-A2 deberá generar el aire de instrumentos y planta para el consumo interno y también para las instalaciones actuales (PP-KU-A1, E-KU-A1y HA-KU-A1), el consumo actual es de 500 *SCFM*.

#### **1.1.5 Aire de instrumentos**

Aire de instrumentos es un término generalmente usado para describir el aire comprimido usado para operar controles neumáticos, válvulas, actuadores, transmisores de presión y otros componentes.

El aire de instrumentos en la plataforma E-KU-A2, tiene como función ser un medio de trabajo para accionar diversos dispositivos de control.

El mayor volumen de aire de instrumentos es utilizado, para operar actuadores de válvulas de control las cuales regulan niveles de presión, flujo, temperatura y líquidos. Accionan válvulas de aislamiento y válvulas que regulan el flujo de gas hacia las plataformas del campo petrolero KU-MA-ZA, crudo de las plataformas de perforación del mismo campo y la presión en las estaciones compresoras.

Una válvula de control, es parte de un sistema de control de procesos, considerada como el elemento final de control, dentro de un circuito automatizado, la cual tiene como función la de regular el fluido del proceso, en donde, interrumpen o permiten el paso del fluido en una determinada dirección o sentido, de seguridad y de regulación de caudal de fluido a pasar por el circuito.

El actuador (o accionador) es la parte de la válvula de control donde se convierte la energía de entrada (neumática), en movimiento mecánico para abrir o cerrar la válvula.

El tamaño del actuador depende de la presión del proceso con la cual se debe mover el vástago, y de la presión de aire de que se dispone; el rango de presión de aire más común es de 3 a 15 *PSIG*.

La figura 1.1 muestra un circuito de control de nivel; su funcionamiento es el siguiente, al llegar el fluido al nivel preestablecido, el flotador sube y envía una señal mecánica al controlador neumático que envía una señal neumática a la válvula de control la cual permite la descarga del tanque de manera controlada.

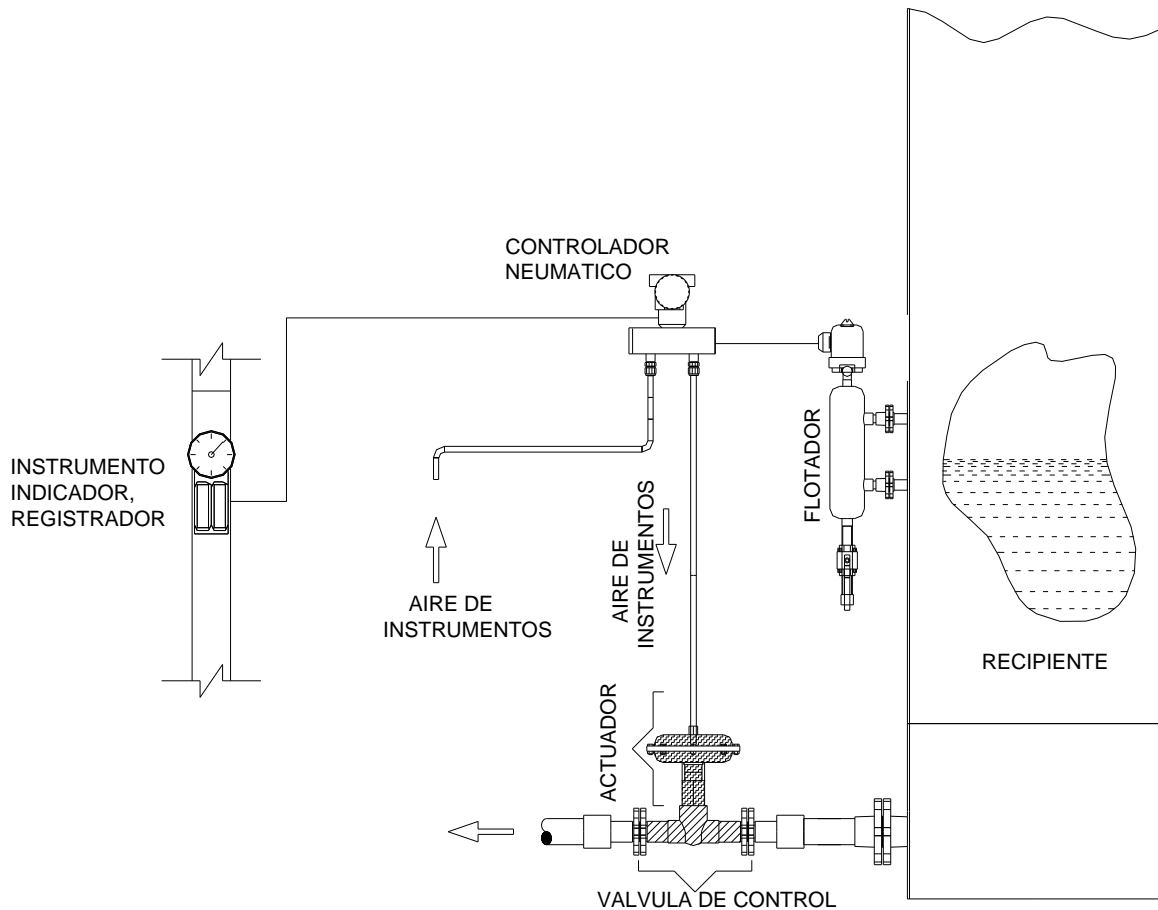


Figura 1.1 Circuito de control de nivel

#### 1.1.6 Localización de la plataforma

Zona:	REGIÓN MARINA NORESTE	
Activo:	PEMEX PEP KU-MALOOB-ZAAP	
Campo:	KU	
Tirante:	65.2 m aprox.	
Coordenadas:	X = 585,290.57	Y = 2,158,609.98
Orientación:	S 45° W.	

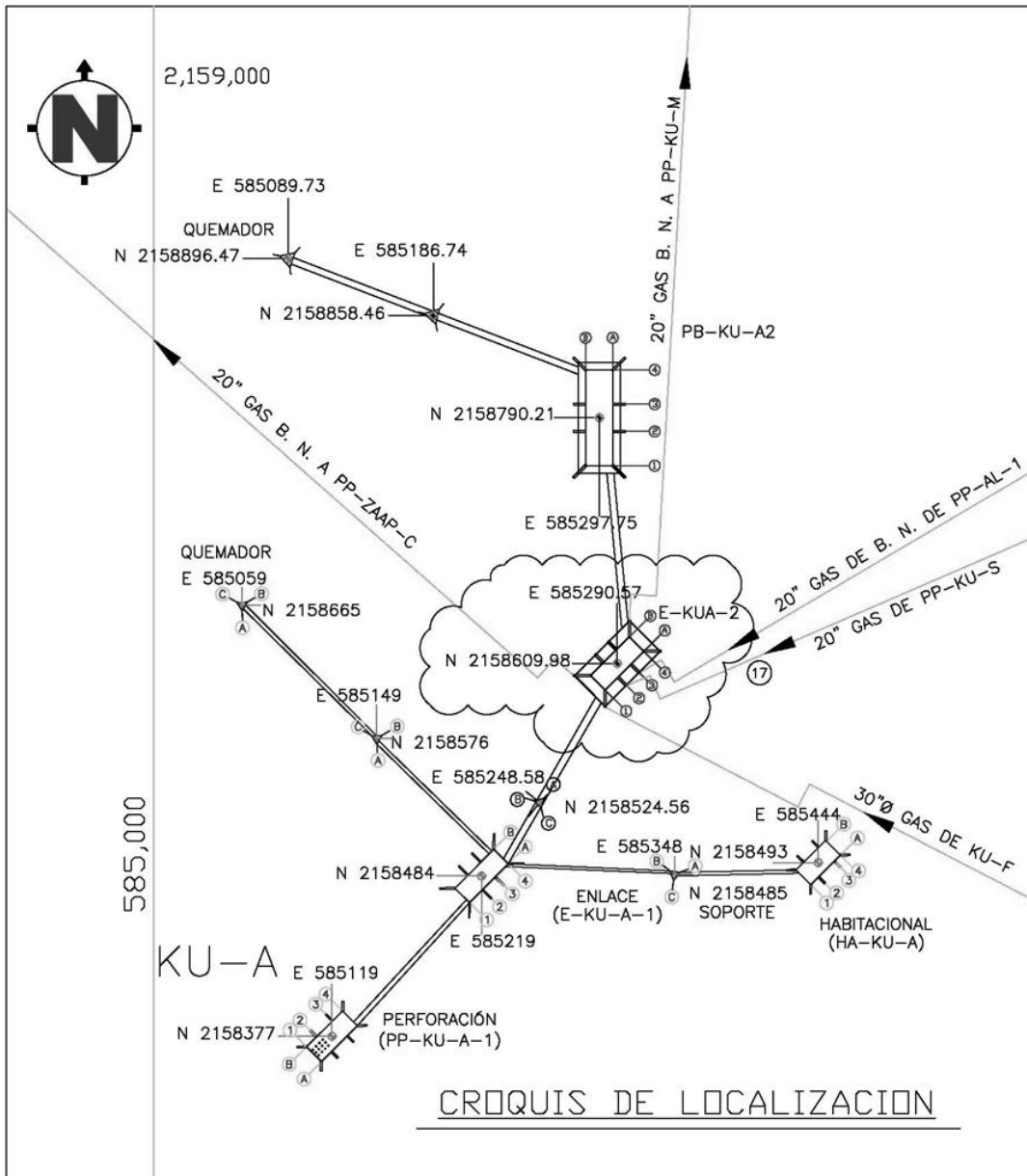


Figura 1.2.-Localización de la plataforma E-KU-A2

La figura 1.2 muestra, dentro de la nube, las coordenadas de localización de la PE-KU-A2, en el complejo KU-A dentro de el campo KU de la región marina noreste del activo KU-MALOOB-ZAAP de PEMEX.

### 1.1.7 Requisitos del paquete de aire de instrumentos

Para la plataforma de enlace PE-KU-A2, PEMEX requiere que el paquete de aire de instrumentos, debe proporcionar un flujo estable y normal de operación de 100 *SCFM* a 164.7 *PSIA* y debe estar integrado por lo siguiente:

**Compresores.** Dos (2) compresores de desplazamiento positivo tipo reciprocantes de pistones no lubricados para el servicio de aire de instrumentos, cada uno con una capacidad (entrega efectiva) de 100 *SCFM*, a una presión de succión de 14.7 *PSIA*, y una presión de descarga de 164.7 *PSIA*. Cada compresor será de dos etapas de compresión.

La temperatura máxima del aire, de las descargas del primer y segundo paso de compresión no deberá ser mayor de 360 °F (182 °C), de acuerdo a lo estipulado por el *API-STD 680*.

El paquete del sistema de aire de instrumentos suministrará el aire de instrumentos para el consumo interno de la plataforma de enlace E-KU-A2 y también para las instalaciones actuales (PP-KU-A1, E-KU-A1 y HA-KU-A1).

**Tanques acumuladores de aire de planta e instrumentos.** Los tanques acumuladores de aire de instrumentos, serán de tipo vertical. Los tanques acumuladores de aire deben ser adecuados para ser instalados y anclados en posición vertical sobre el patín estructural común de todo el paquete; además, deben estar integrados con todos sus instrumentos y accesorios para señalización local y al tablero de control.

**Paquete de secado de aire de instrumentos.** Secadora de aire tipo regenerativa "heatless" de doble torre de secado, con alúmina activada como disecante, de operación automática para una capacidad a la entrada de 115 *SCFM* a una presión de 164.7 *PSIA* de aire seco, equipada con pre-filtro y post-filtro (con gama de filtración de 1 micrón absoluto)

### 1.1.8 DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE.

El Paquete de Aire de Planta e Instrumentos consta de los siguientes equipos: filtro de succión, compresor, enfriador de descarga, separadores, secador, tanque de almacenamiento, como se muestra en la Figura 1.3.

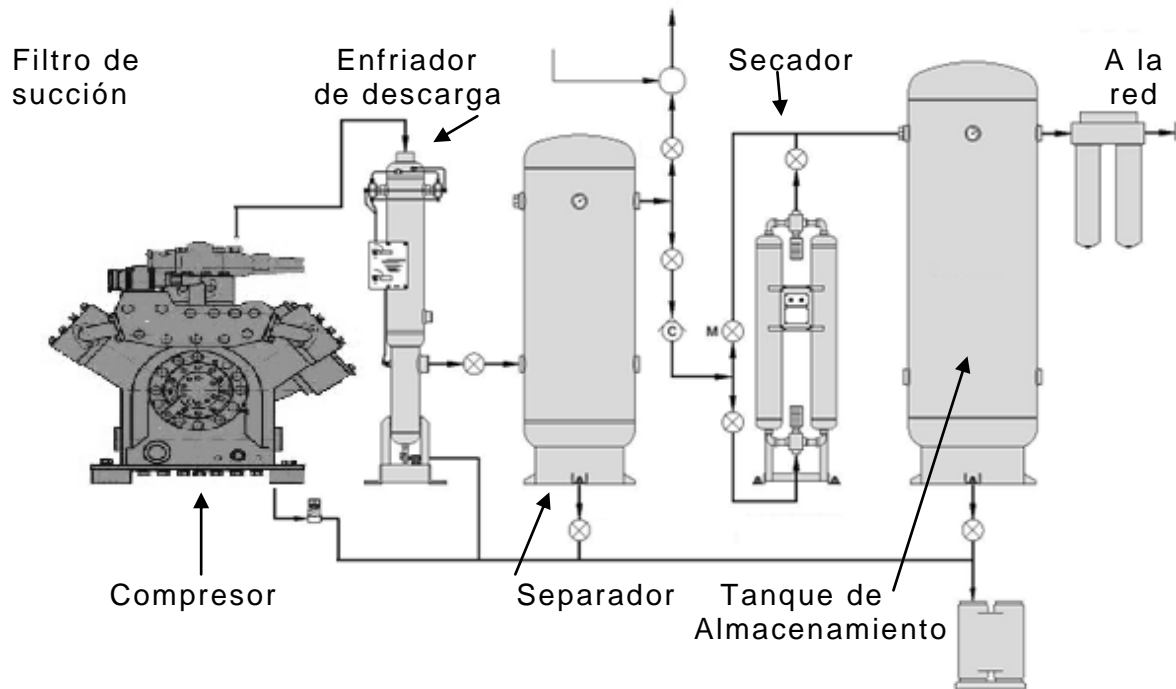


Figura 1.3 Componentes de un paquete de secado de aire para instrumentos

### 1.1.9 Localización del paquete de aire de instrumentos en la plataforma

El espacio en las plataformas petroleras marinas es reducido por lo cual se debe realizar un diseño compacto, sin dejar de tener en cuenta que lo más importante es el suministro de aire a la presión y gasto requerido.

Los tanques recibidores de aire de instrumentos están dentro del patín del paquete y dispuestos en la plataforma, como se indica en el plano de localización general de equipo (PLG).

En el Plano 1.1 se muestra encerrado con una nube, el lugar que le corresponde al paquete de aire de instrumentos dentro de la plataforma





**1.1.10 Datos ambientales.**

Las condiciones ambientales para el desarrollo del proyecto son las siguientes (INEGI):

**TEMPERATURAS.**

Máxima extrema	41.0 °C (105.8°F)
Mínima extrema	14.5 °C (58.1°F)
Media anual	26.6 °C (80°F)
Bulbo seco	26.6 °C (80°F)
Bulbo húmedo	24.6 °C (76.28°F)

**PRESIÓN.**

Presión atmosférica	14.7 <i>PSI</i>
---------------------	-----------------

**Precipitación pluvial.**

Horaria diaria:	54.5 <i>mm</i>
Horaria máxima:	88.0 <i>mm</i>
Anual media:	693-2097 <i>mm</i>

**VIENTOS.****A. VELOCIDADES**

Reinantes:	18.00 <i>kph</i>
Dominantes (norte)	126.00 <i>kph</i>
Máximos	240.00 <i>kph</i>

**B. DIRECCIÓN**

Reinantes:	alisios, noreste
Dominantes, máxima intensidad:	NORTES, NORTE-SUR

**C. HUMEDAD RELATIVA.**

Máxima	95.0%
Mínima:	70.0%
Promedio:	80.0%
Atmósfera.	Tipo: Marina Tropical

### **1.1.11 Clima.**

Cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (mayo – octubre) con periodo de sequía intermedia en agosto y septiembre; Temporada de secas (noviembre – abril) con periodo de lluvias invernales, “nortes” con clasificación AM (Clasificación climática de KOPPEN)

## **1.2 ESTADOS DE LA MATERIA**

La materia puede presentarse en tres estados: sólido, líquido y gas.

Desde el punto de vista atómico o microscópico, las tres fases de la materia difieren. Átomos y moléculas ejercen fuerzas atractivas entre sí, fuerzas que son de naturaleza eléctrica, manteniendo una distancia mínima de separación.

En un sólido las fuerzas atractivas deben ser lo suficiente mente fuertes par que los átomos o moléculas se mantengan en posiciones más o menos fijas, en una red cristalina.

Las fuerzas entre los átomos en un líquido son más débiles de manera que tiene la posibilidad de revolverse entre ellos con movimientos rápidos.

Las fuerzas en un gas son aún más débiles, las velocidades son altas, en todas direcciones y las moléculas no permanecen juntas se mueven rápidamente en todas direcciones chocando entre sí.

El estado de un gas está caracterizado por 3 magnitudes físicas que son: presión  $P$ , volumen  $V$ , temperatura  $T$ . En un gas las moléculas están muy alejadas unas de otras y se mueven en todas direcciones con libertad. Tienen la propiedad de llenar por completo los recipientes en que se encuentran y de ejercer presión sobre las paredes que limitan dichos recipientes.

**1.2.1 Gas ideal.** Una de las generalizaciones más útiles con respecto a los gases es el concepto del gas ideal.

Los gases reales, a presiones y temperaturas cercanas a las ambientales, actúan como gases ideales

Experimentalmente los gases a densidades bastante pequeñas, tienden a mostrar ciertas relaciones simples entre las variables termodinámicas presión  $P$ , su temperatura  $T$  y su volumen  $V$

En cualquier gas en un estado de equilibrio térmico, se puede medir su  $P$ ,  $V$  y  $T$ .

Algunos experimentos demuestran que:

- para una masa dada de gas que se mantiene a temperatura constante, la presión es inversamente proporcional al volumen (ley de Boyle).
- para una masa dada de gas que se mantiene a presión constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura (ley de Charles y Gay Lussac).

### 1.3 LEYES DE LOS GASES

Las leyes de los gases nos indican como varían las propiedades de un gas cuando este interacciona térmicamente con los alrededores.

No existe una línea de separación definida que divida a los gases imperfectos de los ideales o perfectos, pero el criterio de ingeniería es sencillo: si las leyes de los gases ideales rinden resultados suficientemente exactos, la sustancia se considera como un gas ideal; si no, es un gas imperfecto. Aunque ningún gas real es ideal, muchos de ellos se comportan de manera tan semejante, que sus cálculos como gases ideales proporcionan buenas respuestas en ingeniería, de ahí lo práctico.

#### 1.3.1 Ley de Boyle (o de Boyle-Mariotte):

En 1662 el físico inglés Robert Boyle (1627-1691), como conclusión a sus investigaciones estableció la relación:

$$V = T$$

en donde:

$$T = cte \text{ (constante)}$$

El producto de la presión por el volumen es constante.

$$P V = cte$$

o bien

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = cte \quad (1.1)$$

El volumen es inversamente proporcional a la presión:

Si la presión aumenta, el volumen disminuye.

Si la presión disminuye, el volumen aumenta.

Al aumentar el volumen, las partículas (átomos o moléculas) del gas tardan más en llegar a las paredes del recipiente que lo contiene y por lo tanto chocan menos veces por unidad de tiempo contra ellas. Esto significa que la presión será menor ya que ésta representa la frecuencia de choques del gas contra las paredes.

Si se mantiene constante la temperatura de un volumen dado de un gas perfecto, este varía en relación inversa a la presión absoluta durante la variación de sus condiciones o estados.

Si el volumen se divide en dos, la presión se duplica.

### 1.3.2 Ley de Charles.

En 1787, el físico francés Jacques Alexander Charles (1746-1823), enunció que mientras la presión de un gas se mantenga constante, el volumen del gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

En general, se usará el subíndice 1 para referirse a un estado inicial de un gas y el subíndice 2 para el estado final.

Una expresión más útil de la ley de Charles es:

$$\frac{V_1}{T_1} = P$$

En donde:

$$P = cte$$

---

$$\frac{T}{V} = cte$$

o bien,

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2}$$

o bien,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.2)$$

El volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta, asumiendo que la presión se mantiene constante. Esto quiere decir que en un recipiente flexible que se mantiene a presión constante, el aumento de temperatura conlleva un aumento del volumen.

### 1.3.3 Ley de Gay-Lussac.

Joseph L. Gay-Lussac (1778-1850), observó que si el volumen de una muestra de gas permanece constante, la presión absoluta del gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

Esto significa que aumentar al doble, la presión aplicada a un gas, causará que su temperatura absoluta aumente al doble también. La ecuación se puede escribir como:

$$\frac{T}{P} = V$$

en donde

$$V = cte$$

$$\frac{T}{P} = cte$$

o bien,

---

$$\frac{T_1}{P_1} = \frac{T_2}{P_2}$$

o bien,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.3)$$

#### 1.3.4 Ley de Poisson.-

Expresa que, en todo proceso en el que no exista intercambio de calor con el medio externo, la relación entre presión y volumen, viene dada por la ecuación:

$$P_1 V_1^{\frac{C_p}{C_v}} = P_2 V_2^{\frac{C_p}{C_v}} \quad (1.4)$$

Donde la relación de calores específicos,  $\frac{C_p}{C_v}$  es prácticamente constante a bajas presiones y generalmente se designa como:

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (1.5)$$

#### 1.3.5 Ley general de los gases-

En las leyes de los gases, la de Boyle, la de Charles y la Gay-Lussac, la masa del gas es fija y una de las tres variables, la temperatura, presión o el volumen, también es constante. En general, como resultado de un proceso térmico, un proceso sufre cambios en volumen, temperatura y presión. Una relación más general combina las tres leyes como sigue:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1.6)$$

Para una masa de gas, la relación

$$\frac{PV}{T} = cte \quad (1.7)$$

Si la temperatura y el volumen de un gas permanecen constantes, la adición de más gas dará como resultado un incremento proporcional de presión. Asimismo, si se fijan la presión y la temperatura, un incremento en la masa dará como resultado un incremento proporcional de volumen del recipiente. Es posible combinar estas observaciones experimentales como casos especiales con la ecuación anterior, en una ecuación más general:

$$\frac{P_1 V_1}{m_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{m_2 T_2} \quad (1.8)$$

Donde  $m_1$  es la masa inicial y  $m_2$  es la masa final.

**Cantidad de gas.** La cantidad de gas está relacionada con el número total de moléculas que se encuentran en un recipiente. La unidad que utilizamos para medir la cantidad de gas es el mol.

El volumen que ocupa un mol de cualquier gas ideal a una temperatura y presión dadas siempre es el mismo.

El **mol** es una cantidad igual al llamado número de Avogadro:

$$1 \text{ mol de moléculas} = 6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$1 \text{ mol de átomos} = 6,022 \times 10^{23} \text{ átomos}$$

La masa molar de una sustancia pura es la masa que corresponde a 1 mol de dicha sustancia:

$$\text{Masa molar} = \frac{\text{masa en gramos}}{\text{cantidad de moles}}$$

### 1.3.6 Ley de Avogadro.

Un físico italiano Amadeo Avogadro (1776-1856), expresó que:

Volúmenes iguales de un gas ideal, a una misma presión y temperatura, contienen el mismo número de moléculas.



El número de moléculas en 1 mol de cualquier sustancia es una constante  $N_A$ , denominada número de Avogadro.

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas por mol}$$

La razón del número de moléculas  $N$  al número de moles  $n$  debe ser igual que el número de Avogadro  $N_A$ :

$$N_A = \frac{N}{n} \quad \text{Moléculas por mol.}$$

Una forma sencilla para determinar el número de moles  $n$  que contiene un gas es dividir su masa ( $m$ ) en gramos, por su masa molar  $M$ .

De este modo que:

$$n = \frac{m}{M}$$

La masa molar del aire atmosférico es de aproximadamente 28,9 g/mol.

### 1.3.7 Ley del gas ideal.

La ley de los gases ideales es la ecuación de estado del gas ideal, un gas hipotético formado por partículas puntuales, sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos.

**Ecuación general de los gases ideales.** Sustituyendo el número de moles  $n$  por la masa  $m$  en la ecuación (1.8), puede escribirse:

$$\frac{P_1 V_1}{n_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{n_2 T_2} \quad (1.9)$$

La ecuación 1.9 representa la forma más útil de los gases cuando se conocen todos los parámetros de un estado inicial y de un estado final exceptuando una cantidad particular.

**Ecuación de estado.** Es la ecuación que describe normalmente la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la cantidad (en moles) de un gas ideal. La ecuación es:

$$\frac{PV}{nT} = R \quad (1.10)$$

Donde  $R$  es la constante universal de los gases.

En condiciones normales de presión y temperatura, una mol de cualquier gas ideal a una temperatura de  $32\text{ }^{\circ}\text{F} = 491.67\text{ }^{\circ}\text{R}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$ ) y una presión de  $14.7\text{ lbf/pulg}^2 = 1013.25\text{ hPa}$  ocupa un volumen de exactamente  $22,4\text{ litros}$ .

De este modo  $R$  (constante universal de los gases) está dada por:

$$R = \frac{PV}{nT} = \frac{(1\text{ atm})(22.4\text{ litros})}{(1\text{ mol})(273.15)}$$

$$R = 0.0820 \frac{\text{litro atm}}{\text{mol K}}$$

El valor numérico de  $R$  depende de las unidades que se escojan para  $P$ ,  $V$ , y  $T$ . Otros valores son:

$$R = 8.32 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$R = 2 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

$$R = 1545.32 \frac{\text{ft lbf}}{\text{lbmol } ^{\circ}\text{R}}$$

$$R = 1.986 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol } ^{\circ}\text{R}}$$

$$R = 848.06 \frac{\text{kgf m}}{\text{kgmol K}}$$

Como dato adicional, para calcular la constante específica o particular del gas ( $R$ ), se divide entre  $M$  que es la masa molar del gas:

$$R = \frac{1545.32}{M} \text{ pie.lbf / lb.}^{\circ}\text{R}$$

## 1.4 EL AIRE

El aire es el resultado de la mezcla de gases que componen la atmósfera terrestre y que gracias a la fuerza de gravedad se encuentran sujetos al planeta tierra. Su composición y proporciones de las sustancias que lo integran resultan ser variables: nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (varía entre 0 a 7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como pueden ser el criptón o el argón (1%).

### 1.4.1 Propiedades físicas y químicas

#### Físicas

Es de menor peso que el agua.

Es de menor densidad que el agua.

Tiene Volumen indefinido.

No existe en el vacío.

Es incoloro, inodoro e insípido.

Es compresible, es decir su volumen se reduce si se le comprime.

Es expandible, es decir, que ocupa todo el espacio que se le ofrece.

Comúnmente contiene vapor de agua

#### Químicas

Reacciona con la temperatura condensándose en hielo a bajas temperaturas y produce corrientes de aire.

Está compuesto por varios elementos entre ellos el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono elementos básicos para la vida.

El aire limpio y puro forma una capa de aproximadamente 500 000 millones de toneladas que rodea la tierra, de la cual su composición se describe en la Tabla 1.1.

<b>COMPOSICIÓN DEL AIRE PURO</b>		
Elemento	Proporción en volumen	Proporción en peso
Nitrógeno	78,14	75,6
Oxígeno	20,92	23,1
Argón	0,94	0,3
Neón	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Helio	$5 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$
Criptón	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Hidrogeno	$5 \cdot 10^{-5}$	$0,35 \cdot 10^{-5}$
Xenón	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$

Tabla 1.1 Composición del aire

Normalmente, en el aire existen otras sustancias, con vapor de agua en cantidad variable y dióxido de carbono (0,03% en volumen) y en las zonas industriales, hidrocarburos, alquitranes, cenizas, polvo y bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

### 1.5 LA CONTAMINACIÓN EN EL AIRE COMPRIMIDO

El aire ambiental se encuentra siempre contaminado con aerosoles sólidos y líquidos, gases, vapores y microorganismos. La naturaleza y las concentraciones de estos contaminantes dependen del sitio en donde se coloca el compresor (medio ambiente) y varía con la hora del día, la época del año y otros factores, como son el tipo de industria a la que se destina el sistema de secado de aire, en este caso, el sitio es una plataforma petrolera con ambiente marino. Estos contaminantes sólidos y líquidos se separan en gran parte en el filtro de succión del compresor, los gases y los vapores no son detenidos en tal filtro y permanecen en el aire que entra al compresor.

En esta parte se conocerán las fuentes de la contaminación del aire comprimido y sus consecuencias en el sistema, así como la termodinámica básica y leyes principales para la deducción de las fórmulas para cálculo de un compresor.

### **Fuentes de contaminación en el aire comprimido**

El aire en el medio ambiente es la fuente del aire que comprime el compresor, por lo tanto la contaminación en el aire comprimido proviene de la contaminación ambiental.

**Contaminación ambiental.** La contaminación ambiental se manifiesta por la presencia de sustancias en concentraciones más altas de los niveles normales, que producen efectos dañinos para el hombre, animales y vegetales; estas sustancias pueden ser compuestos naturales o productos químicos, en forma de gases, o de partículas sólidas o líquidas denominadas aerosoles.

Al tratar de la contaminación ambiental, nos interesa primordialmente aquella contaminación que penetra al compresor, con el aire, atravesando los filtros de succión.

La contaminación del aire puede provenir de:

- Vapor de agua atmosférico proveniente de:
- La evaporación de las aguas naturales (océanos, lagos, aguas de lluvia, etc.)
- La respiración de los seres vivos
- La combustión de los cuerpos que contienen hidrógeno.
- Fuentes móviles: como son los vehículos de motor de gasolina o diesel.
- Fuentes fijas: instalaciones industriales, plantas termoeléctricas, talleres, Industrias, etc.
- Emisiones de fuentes varias: incineración y quema de desechos al aire libre, etc.

- Fenómenos naturales: ejemplo de ellos los vientos que levantan a la atmósfera muchas toneladas de polvo
- El aire ambiental contiene cantidades sensibles de aceite o hidrocarburos.

### 1.5.1 Clasificación de contaminantes

Estos se clasifican en sólidos, líquidos, gases y organismos aéreos vivientes.

#### **Sólidos**

**Polvos:** Son en general formados por partículas menores de 100 micras. Pueden ser minerales, vegetales o animales.

#### **Humos:**

- a) Provenientes de combustiones incompletas de sustancias orgánicas.
- b) Provenientes de la sublimación y la oxidación de metales fundidos. Son de 0.1 a 100 micras.

#### **Líquidos**

**Rocíos:** Gotas provenientes de la atomización de líquidos, a presión y temperaturas normales.

**Nieblas:** Gotas formadas por condensación de vapores.

#### **Gases**

**Vapores:** Son la fase gaseosa de sustancias líquidas o sólidas en su estado normal.

**Gases propiamente dichos:** Son fluidos amorfos que tienden a ocupar todo el espacio en que se encuentran en forma completa y uniforme.

#### **Organismos aéreos vivientes**

**Virus:** Fluctúan entre 0.005 a 0.5 micras. Están agrupados en colonias.

**Bacteria:** Entre 0.4 a 12 micras.

**Esporas:** Entre 10 a 30 micras.

**Polen:** Entre 10 a 100 micras.

Como referencia a las concentraciones de microorganismos en el aire, se puede hablar desde unos pocos hasta algunos miles por metro cúbico.

Se ha comprobado que la mayor concentración de microorganismos se encuentra en tamaños que fluctúan entre 2 y 5 micras.

### **1.5.2 Problemas causados por la acción de los contaminantes**

Como ya se vio la contaminación en el aire comprimido puede provenir del aire ambiental succionado en la toma del compresor o después del mismo sistema, causada a su vez por la acción de los contaminantes originales y puede dividirse en los siguientes grupos:

**Agua:** Después de la compresión, el aire comprimido es enfriado haciéndolo pasar a través del postenfriador que generalmente se instala contiguo del compresor, ya que la corriente del aire se encuentra siempre saturada con vapor de agua al ser enfriado libera agua en forma líquida, en gotas y niebla (aerosol), que al condensarse en los tubos y elementos del sistema, reduce la transmisión del aire disminuyendo la sección útil, llegando incluso a taponarlos.

**Partículas:** Proviene del compresor, puesto que las que estaban presentes en el ambiente se separaron en el filtro a la succión, además las partículas de los conductos causados por oxidación, erosión, corrosión en general e impurezas no retiradas con anterioridad.

**Hidrocarburos:** Líquidos que se emulsionan con el agua líquida y aglutinan partículas y vapores, que pueden contaminar y alterar el olor y el sabor de los alimentos o productos en contacto con el aire comprimido.

**Microorganismos:** Su proliferación se incrementa con la presencia de humedad.

**Vapores de aceites:** En compresores que utilizan aceites como lubricantes, las gotas de agua, por el flujo turbulento del aire comprimido, son la causa principal de la erosión en las líneas ya que parte del agua forma un aerosol. Las gotas son acarreadas con la corriente a altas

velocidades, hasta que impactan sobre la primera obstrucción que encuentran, ya sea un codo, el disco de una válvula, una placa de orificio, e instrumentos que utilizan aire comprimido. Los impactos repetidos producen fuerzas destructivas en las superficies, causando la erosión. Una superficie erosionada propicia depósitos ácidos y salinos, que debido a la acción química continúa el proceso de corrosión. Una vez debilitada la superficie, la acción de vibraciones y flexiones, producen daños, como rupturas y agrietamientos en todo el sistema de aire.

El aire atmosférico siempre contiene humedad o vapor de agua. La cantidad de humedad retenida en el aire se determina por la temperatura y por la presión.

Cualquier baja en la temperatura o incremento en la presión causará la condensación de la humedad del aire formando agua en su fase líquida.

El agua líquida pura por si misma, no es corrosiva, sin embargo, cuando se combina con partículas de sal o gases ácidos, forma soluciones muy corrosivas.

Los vapores y aerosoles de aceite generados en el compresor, típicamente ácidos, y los gases presentes en el aire ambiental, tales como el dióxido de azufre y el cloruro de hidrógeno, se combinan rápidamente con el agua, formando ácidos clorhídrico y sulfhídrico que atacan los metales, primero disolviendo y después atacando su superficie.

La corrosión se lleva a cabo aún en ausencia de agua en su fase líquida. Las moléculas de agua que se adhieren a las superficies metálicas atraen, a su vez, moléculas de oxígeno, continuando el proceso de corrosión. Aunque la oxidación es extremadamente lenta en superficies metálicas limpias a humedades relativas menores a 50%, la presencia de una película de óxido aumenta grandemente la concentración de agua y oxígeno, promoviendo la oxidación. Esta acción deja de manifestarse en humedades relativas menores al 2%, equivalente a un punto de rocío de -35 °C referido a la presión del aire comprimido.

La humedad en el aire hace posible el crecimiento de colonias de bacterias, hongos y moho. Estos organismos producen corrosión por su



acción ácida y pueden también contaminar los productos que toca el aire. Se ha comprobado que reducir la humedad relativa a 10% o menos inhibe el crecimiento de estos microorganismos, evitando su acción corrosiva.

### **1.5.3 Resumen:**

Como se indico previamente, hay diversos contaminantes en el aire comprimido debido a los cambios en las condiciones originales de volumen, presión y temperatura que experimenta el aire al ser comprimido.

La presencia de agua, aceite y polvo en una línea de aire comprimido puede ocasionar los siguientes problemas:

- Corrosión y oxidación de los componentes del sistema de aire comprimido.
- El polvo y partículas que entran en contacto con el agua proveniente del aire, forman una pasta que provoca el mal funcionamiento de los elementos del sistema de aire.
- Incrustaciones que pueden desprenderse y dañar a los componentes, provocando desajustes en los instrumentos.
- Líneas de aire corroídas por goteo.
- Pérdidas de lubricantes necesarios en controles y herramientas neumáticas.
- Escamado en superficies pintadas por atomización.
- Bloqueos y aún rupturas en líneas de aire y válvulas.
- Baja calidad en los productos terminados y bajos rendimientos en las reacciones químicas.
- Disminuye la potencia y eficiencia de los equipos e instrumentos neumáticos.
- Incrementa los gastos de mantenimiento y reparación de todos los elementos del circuito de aire.

---

## 2 Consideraciones Generales del Compresor de Aire de Instrumentos

En este capítulo se dará una explicación breve de los tipos de compresores, así como sus conceptos termodinámicos indispensables para comprender su funcionamiento. Se desarrollan las fórmulas básicas para calcular los parámetros del compresor seleccionado, partiendo de los requerimientos del proceso, y obtener así, una selección adecuada para suministrar la cantidad de aire y presión de trabajo requeridas. Para la producción del aire comprimido se utilizan compresores, que elevan la presión del aire, a la requerida.

### 2.1 COMPRESORES

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por éste convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

#### 2.1.1 Compresores de aire

Para que el aire transmita energía, necesita ser comprimido o aumentado a una presión más alta. Cuando el aire es comprimido se le da energía que puede proporcionar la energía para la maquinaria, generalmente con el uso de pistones que empujan el aire comprimido hacia adelante y hacia atrás.

Los compresores pueden clasificarse en dos grupos principales los de desplazamiento positivo y los dinámicos.

-Los compresores de desplazamiento positivo son máquinas en las que se confina sucesivamente volúmenes definidos de aire dentro de un espacio cerrado, y se aumenta su presión reduciendo el volumen del espacio cerrado. Este grupo comprende tanto los compresores del tipo reciprocante como los del tipo rotatorio.

-Los compresores dinámicos son máquinas en las cuales se comprime el aire mediante un miembro rotatorio que imparte presión y velocidad (energía cinética) al medio compresible. Por acción difusora, la energía de velocidad es transformada en energía de presión. Los compresores de este tipo comprenden a los centrífugos, a los axiales y a los de flujo mixto.

Los tipos principales de compresores incluidos en estas categorías se indican en la Figura 2.1

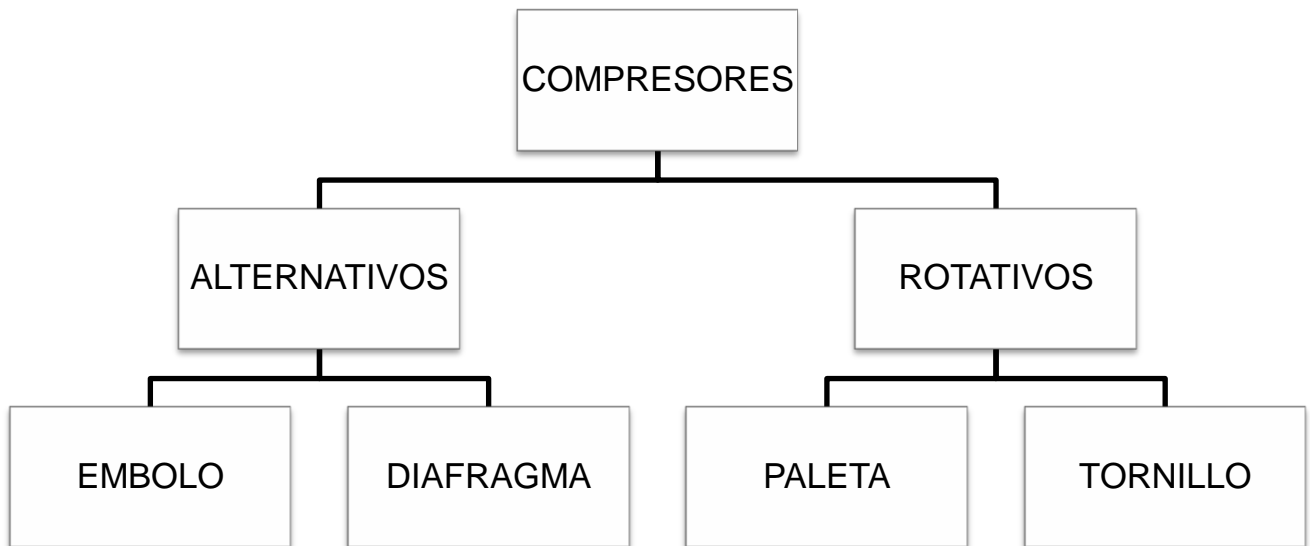


Figura 2.1 Tipos principales de compresores utilizados en los sistemas neumáticos

### 2.1.2 Compresores alternativos

#### Compresor de émbolo de una etapa

El aire a presión atmosférica se comprime a la presión deseada con una sola compresión.

El movimiento hacia abajo del émbolo aumenta el volumen para crear una presión más baja que la atmosférica, lo que hace fluir el aire en el cilindro por la válvula de entrada.

Al final de la carrera, el émbolo se mueve hacia arriba, la válvula de entrada se cierra cuando el aire se comprime, obligando a la válvula de salida a abrirse para descargar el aire en el depósito, como se muestra en forma esquemática en la Figura 2.2.

Este tipo de compresor se utiliza generalmente en sistemas que requieran aire en la gama de 3-7 bares. ( $43.5 \text{ lb/in}^2$  -  $101.5 \text{ lb/in}^2$ ).

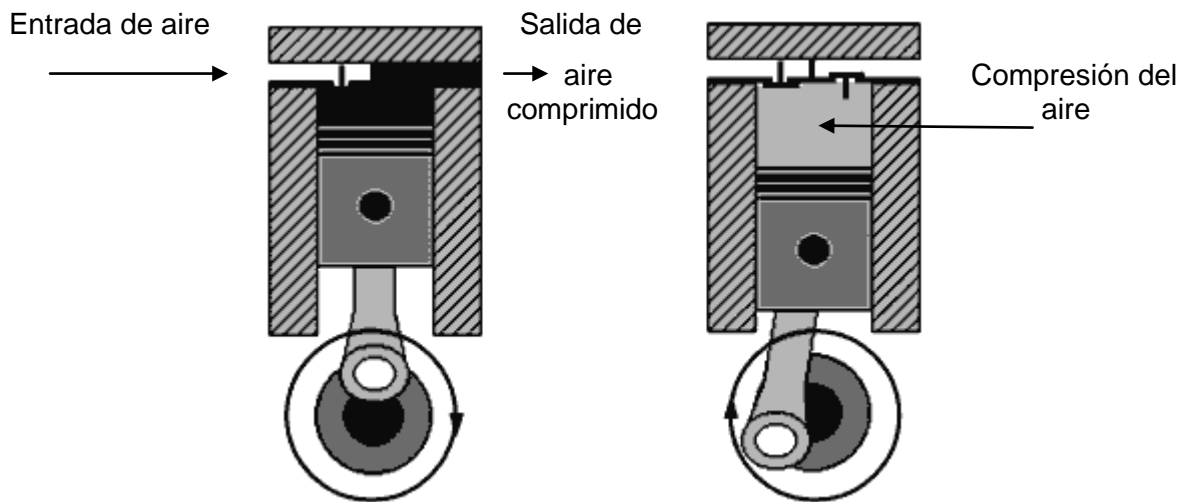


Figura 2.2 Compresor de émbolo de una sola etapa

#### Compresor de émbolo de dos etapas

En un compresor de una sola compresión, cuando se comprime el aire por encima de 6 bares ( $87 \text{ lb/in}^2$ ), el calor excesivo que se crea reduce en gran medida su eficacia. Debido a esto, los compresores de émbolo utilizados en los sistemas industriales de aire comprimido son generalmente de dos etapas, el aire captado a presión atmosférica se comprime en dos etapas hasta la presión final.

Si la presión final es de 7 *bares* (101.5 *lb/in<sup>2</sup>*), la primera compresión normalmente comprime el aire hasta aproximadamente 3 *bares* (43.5 *lb/in<sup>2</sup>*), tras lo cual se enfría. Se alimenta entonces el cilindro de la segunda compresión que comprime el aire hasta 7 *bares* (101.5 *lb/in<sup>2</sup>*).

La Figura 2.3 muestra como el aire comprimido entra en el cilindro de segunda compresión a una temperatura muy reducida, tras pasar por el refrigerador intermedio, mejorando el rendimiento en comparación con una unidad de una sola compresión. La temperatura final puede estar alrededor de 120 °C (248 °F)

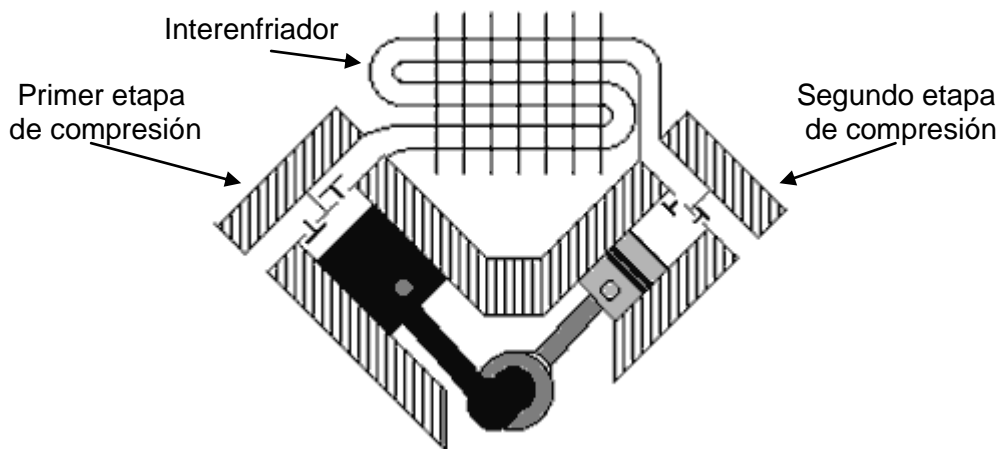


Figura 2.3 Compresor de émbolo de dos etapas

### **Compresor de diafragma.**

Los compresores de diafragma suministran aire comprimido seco hasta 5 *bares* (72.5 *lb/in<sup>2</sup>*) y totalmente libre de aceite, por lo tanto se utilizan ampliamente en la industria alimenticia, farmacéutica y similar.

El diafragma proporciona un cambio en el volumen de la cámara, lo que permite la entrada del aire en la carrera hacia abajo y la compresión en la carrera hacia arriba como se indica en la Figura 2.4.

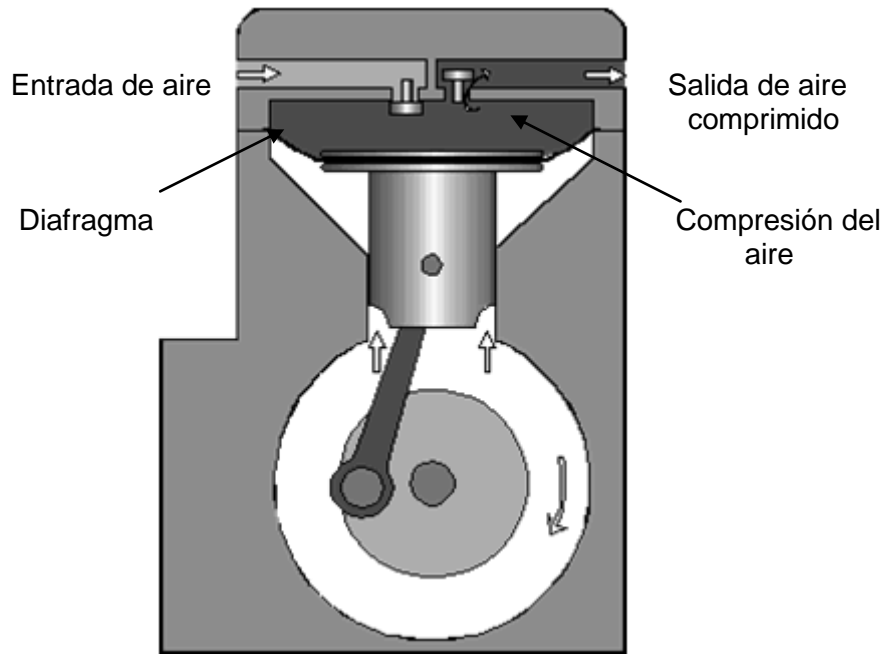


Figura 2.4 Compresor de diafragma

### 2.1.3 Compresores rotativos

#### Compresor rotativo de paleta deslizante

Este compresor tiene un rotor montado excéntricamente con una serie de paletas que se deslizan dentro de ranuras radiales.

Como se muestra en la Figura 2.5, al girar el rotor, la fuerza centrífuga mantiene las paletas en contacto con la pared del estator y el espacio entre las paletas adyacentes disminuye desde la entrada de aire hasta la salida, comprimiendo así el aire.

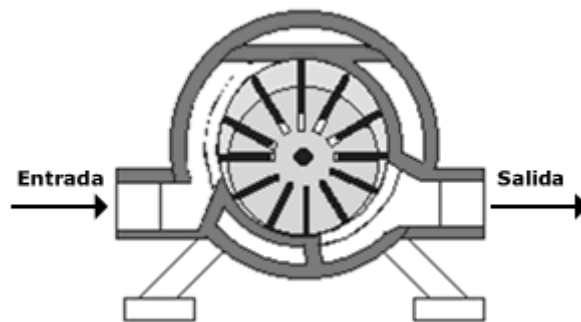


Figura 2.5 Compresor de paleta

La lubricación y la estanqueidad se obtienen inyectando aceite en la corriente de aire cerca de la entrada. El aceite actúa también como refrigerante para eliminar parte del

calor generado por la compresión, para limitar la temperatura alrededor de  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $374\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).

### Compresor de tornillo

Dos motores helicoidales engranan girando en sentidos contrarios. El espacio libre entre ellos disminuye axialmente en volumen, lo que comprime el aire atrapado entre los rotores o tornillos como se muestra en la Figura 2.6.

El aire lubrica y cierra herméticamente los dos tornillos rotativos. Los separadores de aceite eliminan el mismo del aire de salida.

Con estas máquinas se pueden obtener caudales unitarios continuos y elevados, de más de  $400\text{ m}^3/\text{min}$  ( $14125.9\text{ CFM}$ ) a presiones superiores a 10 bares ( $142.14\text{ PSI}$ ).

Este tipo de compresor, más que el compresor de paletas, ofrece un suministro continuo libre de altibajos.

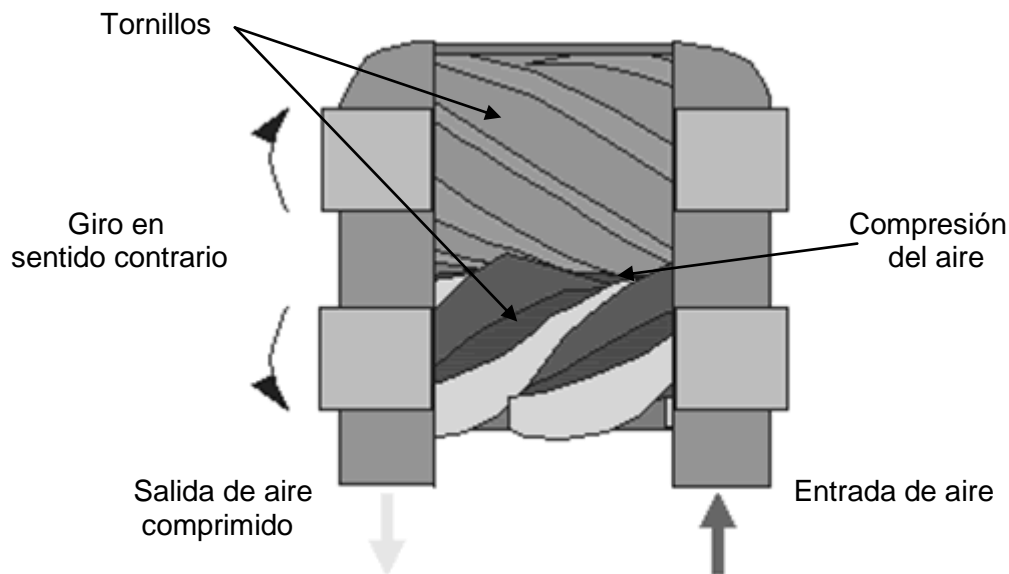


Figura 2.6 Principio del compresor de Tornillo

El tipo industrial de compresor de aire más común sigue siendo el compresor tipo *alternativo*, aunque los tipos de tornillo y paletas se están usando cada vez más.

### 2.1.4 Ciclo ideal de compresión.

Se realiza un estudio del ciclo teórico de trabajo de un compresor ideal, para poder extraer las conclusiones de cómo nos interesa que se produzca la compresión.

Los compresores, del tipo rotativo (alabes) como del tipo de movimiento alternativo (pistón), pueden considerarse como una base general, como máquinas de flujo estacionario, para el fin de obtener la ecuación de potencia.

Considérese para el estudio, un compresor recíprocante, que consiste en un conjunto de pistón y cilindro, equipado con dos válvulas, una permite la entrada del gas y la otra permite que el gas comprimido fluya a un depósito donde se almacena o hacia un eliminador de pulsaciones. En la figura 2.7 asumiendo que las dos válvulas son ideales y carentes de fricción y al igual no existe fricción entre el pistón y el cilindro y se supone que no hay espacio libre en el pistón y la tapa del cilindro.

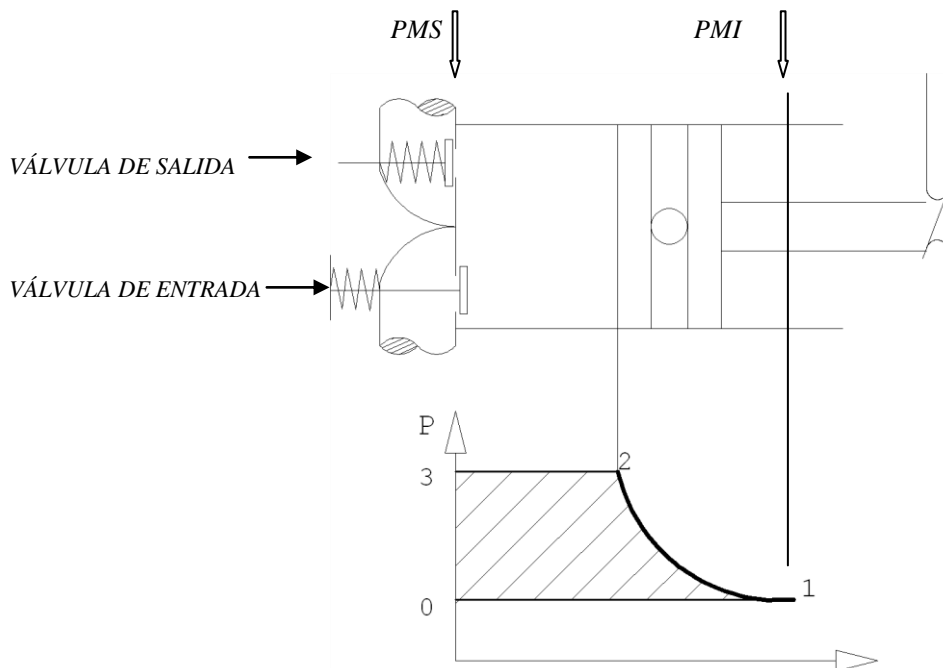


Figura 2.7. Ciclo ideal de compresión sin espacio perjudicial

En primer lugar al pistón al inicio del proceso en el punto muerto superior (*PMS*), en el punto cero de la grafica. Según se retira el pistón, la válvula de entrada se abre de modo instantáneo, y el gas, a la presión de succión llena el cilindro, hasta que el pistón llega al estado uno, punto muerto inferior (*PMI*).

Entonces el pistón invierte la dirección de su movimiento, la presión dentro del cilindro tiende a aumentar y la válvula de entrada se cierra instantáneamente.



El pistón penetra dentro del cilindro, la presión se eleva de manera continua hasta alcanzar la presión de descarga o la del depósito, estado dos.

En dos la válvula de salida se abre instantáneamente y el gas es empujado hacia el depósito durante el proceso 2-3.

El punto tres representa la condición final, cuando el pistón alcanza la posición cero (*PMS*). Así se completa un ciclo ideal de compresión.

## 2.2 PROCESOS TERMODINÁMICOS DE LA COMPRESIÓN DEL AIRE

Si un sistema realiza un proceso termodinámico de modo tal que no haya intercambio de calor (energía) con el medio circundante, se lo denomina *proceso adiabático*. Este tipo de proceso tiene lugar si el sistema estuviera perfectamente aislado térmicamente o bien si el proceso se realiza lo suficientemente rápido, es decir no se produce un intercambio de calor con el medio circundante.

El proceso es *isotérmico* si el sistema puede intercambiar energía con su medio y el proceso se realiza lentamente, de modo que el sistema tenga tiempo de entrar en equilibrio térmico con el medio circundante.

Cuando el proceso es intermedio entre estos dos extremos (adiabático e isotérmico) el proceso se denomina *politrópico*.

A presiones moderadas, igual o menor a  $3 \text{ bar}$  ( $P \leq 3 \text{ Bar}$ ) ( $P \leq 43.5 \text{ lb/in}^2$ ), casi todos los gases pueden ser considerados como gases ideales. Esto significa que, entre otras propiedades, ellos se comportan siguiendo la ecuación de estado:

$$P V = n R T$$

donde,  $P$  es la presión absoluta del aire,  $V$  su volumen,  $T$  la temperatura absoluta,  $n$  el número de moles del aire y  $R$  la constante universal de los gases.

Cuando el aire es sometido a distintos procesos termodinámicos, este sigue trayectorias en un diagrama  $PV$  que son características del tipo de proceso al que es sometido. El cuadro 2.1 indica algunos procesos usuales con sus ecuaciones características:

PROCESO	ECUACION CARACTERÍSTICA
<i>Isobárico</i>	$P = cte$
<i>Isocórico</i>	$V = cte$
<i>Isotérmico</i>	$PV = cte$
<i>Adiabático</i>	$PV^k = cte$
<i>Politrópico</i>	$PV^n = cte$

Cuadro 2.1 Procesos y ecuaciones características del aire

### 2.2.1 Proceso isobárico

Un proceso Isobárico es aquel que ocurre a presión constante. Como se muestra en la Figura 2.8, donde para pasar del volumen del estado A al estado B, es preciso solo añadir calor. El cambio de temperatura es proporcional a la relación de volumen.

$$T_2 - T_1 = T_1 \left( \frac{V_2}{V_1} - 1 \right) \quad (2.1)$$

La cantidad de calor a añadir será:

$$q_{1,2} = c_p m (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

en donde:

$c_p$  es el calor específico a presión constante en  $J/(KgK)$

$m$  es la masa en  $Kg$ .

$T$  es la temperatura en  $K$

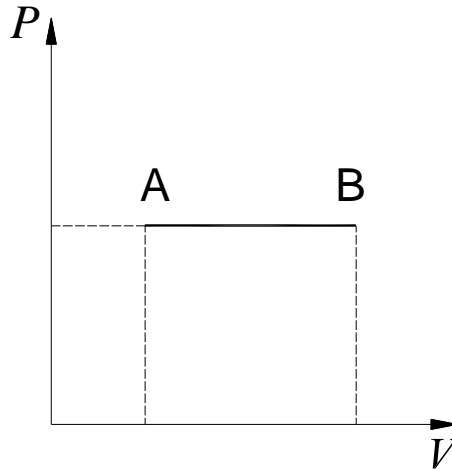


Figura 2.8 Proceso Isobárico

### 2.2.2 Proceso isocórico.

Aquel proceso termodinámico que se realiza a volumen constante. En la Figura 2.9, para elevar la presión desde el estado A al estado B es necesario añadir calor.

En un recipiente de paredes gruesas que contiene un gas determinado, al que se le suministra calor, observamos que la temperatura y presión interna se elevan, pero el volumen se mantiene igual.

En un proceso que se efectúa a volumen constante sin que haya ningún desplazamiento, el trabajo hecho por el sistema es cero.

Es decir, en un proceso isocórico no hay trabajo realizando por el sistema, y no se adiciona calor al sistema que ocasione un incremento de su energía interna.

$$T_2 - T_1 = T_1 \left( \frac{V_2}{V_1} - 1 \right) \quad (2.3)$$

La cantidad de calor a añadir será:

$$q_{1,2} = c_v m (T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

en donde:

$c_v$  es el calor específico a volumen constate en  $J/(Kg K)$

$m$  es la masa en  $Kg$  o libras.

$T$  es la temperatura absoluta en  $K$ .

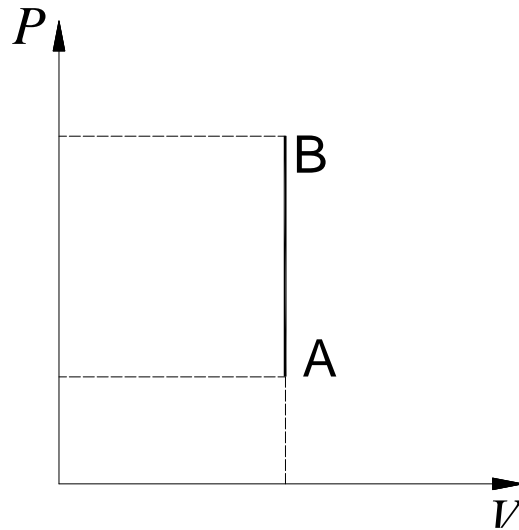


Figura 2.9 Proceso Isocórico

### 2.2.3 Proceso isotérmico.

Aquel proceso termodinámico que se realiza a temperatura constante. En la figura 2.10, para comprimir el gas desde el estado A al estado B, el calor se disipa, manteniéndose así la temperatura constante. El cambio de presión es inversamente proporcional a la relación de volumen.

$$P_2 - P_1 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right) \quad (2.5)$$

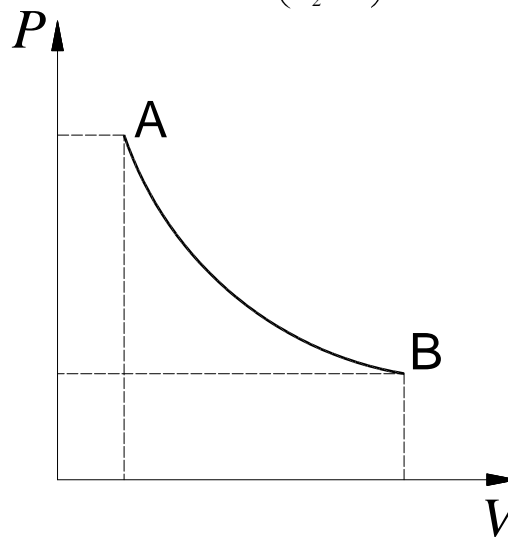


Figura 2.10. Proceso Isotérmico

La cantidad de calor a disipar es igual al trabajo de compresión.

$$q_{1,2} = P_1 V_1 10^5 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

o también

$$q_{1,2} = R T_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

en donde:

$P$  es la presión absoluta en *bar* o *PSI*

$V$  es el volumen en *metros cúbicos* ó *pies cúbicos*

$T$  es la temperatura absoluta en *K*.

$R$  es la constante del gas en *J/ (KgK)*

#### 2.2.4 Proceso adiabático

Un proceso adiabático en termodinámica, es cualquier proceso físico en el que magnitudes como la presión o el volumen se modifican sin una transferencia significativa de energía calorífica hacia el entorno o desde éste.

El proceso tiene lugar demasiado rápido como para que el calor perdido sea reemplazado desde el entorno, por lo que la temperatura desciende. El efecto inverso, un aumento de temperatura, se observa cuando un gas se comprime rápidamente. Muchos sistemas comunes, como los motores de automóvil, presentan fenómenos adiabáticos.

En este tipo de proceso no existe transferencia de calor entre el sistema con el medio exterior. Por consiguiente, en todo proceso adiabático se verifica:

$$Q = 0$$

$$W = - \Delta U$$

De igual manera se cumple:

$$PV^k = cte$$

Donde:

$P$ : presión del gas,  $N/m^2$

---

$V$ : volumen del gas,  $m^3$

El coeficiente adiabático del gas  $k$  se calcula:

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

Donde:

$k$ : coeficiente adiabático del gas, adimensional

$C_p$ : calor específico del gas a presión constante,  $Cal/Kg^{\circ}C$

$C_v$ : calor específico del gas a volumen constante,  $Cal/Kg^{\circ}C$

El trabajo realizado por un gas en un proceso adiabático se cuantifica a través de siguiente expresión:

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k}$$

Donde:

$P_2, P_1$ : presión final e inicial del gas respectivamente,  $N/m^2$

$V_2, V_1$ : volumen final e inicial respectivamente,  $m^3$

$W$ : trabajo desarrollado por el gas,  $Joule = N.m$

### 2.2.5 Proceso politrópico

En la realidad, no se da, ni una ni otra de las evoluciones anteriores; lo que se consigue es una intermedia, es decir una compresión con refrigeración imperfecta, que realmente la podemos describir como una compresión politrópica con un exponente  $n$ , comprendido entre:

$$1 < n < 1,4$$

Usualmente, para compresores pequeños refrigerados por aire:

$$n = 1,35$$

Para compresores medianos refrigerados por agua:

$$1,2 < n < 1,3$$

La ecuación de la politrópica para el trabajo y potencia, es respectivamente:

$$W = P_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$
$$\dot{W} = \dot{m} P_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Al realizar una comparación de los diferentes procesos descritos previamente, se obtiene que el menor gasto de energía ocurre en el proceso isotérmico, razón por la cual se busca que los compresores presenten este comportamiento.

### 2.3 COMPRESIÓN DEL AIRE

El aire no tiene una forma determinada, toma la forma del recipiente que lo contiene, permite ser comprimido y tiene la tendencia a dilatarse, comportamiento que se describe la *Ley de Boyle* en el párrafo 1.3.1 del capítulo 1.

La compresión del aire consiste en acercar las moléculas entre sí eliminando el espacio que existe entre las mismas, lo cual es una característica general de los gases.

#### 2.3.1 Factor de Compresibilidad.

La compresibilidad es una propiedad de los gases en donde al aumentar la presión el volumen del gas se reduce.

La presión, volumen y temperatura de los gases, no presentan un comportamiento que pueda ser representado, con exactitud, mediante la ecuación térmica de los gases ideales

$$Pv = RT \tag{2.8}$$

Excepto cuando la presión es razonablemente baja y la temperatura relativamente alta.

Una manera de adecuar la ecuación térmica de los gases ideales para que sea aplicable a gases reales, consiste en introducir un coeficiente corrector que denominamos factor de compresibilidad,  $Z$ .

El factor de compresibilidad se define en la forma

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad (2.9)$$

En algunos casos las desviaciones de  $Z$  son considerables, por lo que es necesario se tomen en cuenta en los cálculos para evitar errores en la selección de los equipos. El valor de  $Z$  depende del gas y está en función de la presión y la temperatura.

De acuerdo a la ecuación 2.9 para un gas real tenemos:

$$Pv = ZRT$$

Muy similar a la ecuación 2.8, salvo por la afectación del factor de compresibilidad  $Z$ .

Puesto que  $RT/P$  es el volumen molar de un gas ideal, el factor de compresibilidad

puede definirse en la forma  $Z = \frac{v}{v_i}$ , es decir, como el cociente entre el volumen molar

real del gas y el volumen molar del gas si su comportamiento, a las mismas condiciones de  $P$  y  $T$ , fuera ideal.

Teniendo en cuenta que el volumen molar es igual al volumen total dividido por el número

de moles,  $v = \frac{V}{n}$ , la expresión 2.9 equivale a:

$$PV = ZnRT \quad (2.10)$$

Una forma de pensar en  $Z$  es como un factor que convierte la ecuación en una igualdad.

Si se grafica el factor de compresibilidad para una temperatura dada contra la presión para diferentes gases, se obtienen curvas. En cambio, si la compresibilidad se grafica contra la presión reducida en función de la temperatura reducida, entonces para la mayor parte de los gases los valores de compresibilidad a las mismas temperatura y presión reducidas quedan aproximadamente en el mismo punto.

Para un gas ideal el factor de compresibilidad, de acuerdo a su definición, es uno. Por tanto, para un gas real el factor de compresibilidad debe tener una tendencia a uno a medida que la presión tiende a cero.

### 2.3.2 Relación de compresión.



Es la relación entre el volumen máximo, del cilindro (cilindro en punto muerto inferior) y el volumen mínimo (cilindro en el punto muerto superior). Partiendo de lo anterior, se obtiene la expresión siguiente

$$Rc = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.11)$$

### 2.3.3 Capacidades.

Las capacidades se pueden expresar en diversas formas:

$w$ : Flujo en peso, lb/h o lb/min

Gasto, referido a las condiciones estándar, expresado como:

*SCFM*: pies cúbicos estándar por minuto

El gasto, en relación con las condiciones en la succión que se suele expresar como:

*ACFM*,  $ft^3/min$

No importa la forma en que se exprese la capacidad, hay que convertirla a las condiciones de succión para seleccionar el compresor del tamaño correcto. Esta conversión se puede hacer con el empleo de la ley del gas ideal (Ecuación 1.8):

$$\frac{P_1 V_1}{m_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{m_2 T_2} \quad (2.12)$$

## 2.4 ECUACIONES PARA UN COMPRESOR RECIPROCANTE DE AIRE

Existen dos maneras de llevar a cabo los cálculos termodinámicos para los compresores

1. Proceso adiabático reversible (Isentrópico).- Proceso en cual no existe intercambio de calor en el sistema.

La entropía es constante

$$PV^k = cte$$

2. Proceso reversible politrópico.- Es aquel en el cual las características del gas durante la compresión son críticas

$$PV^n = cte$$

En el proceso, cuando la temperatura es constante se tiene  $n = 1$  (compresión isotérmica),

Cuando la presión es constante se tiene  $n = 0$ , (compresión isobárica).

Cuando el volumen es constante se tiene que  $n = \alpha$ , (compresión isocórica)

Generalmente no es práctico construir un equipo de transferencia de calor para un diseño de más de un compresor que comunique todo el calor de compresión. De ahí que la tendencia de las maquinas es operar a lo largo de un proceso politrópico el cual se aproxime al adiabático.

Las siguientes son relaciones que se pueden desarrollar entre presión, temperatura y volumen para un proceso politropico entre los estados 1 y 2.

Las leyes de los gases ideales establecen que:

$$PV = RT \quad (2.13)$$

Esto es:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \quad (2.14)$$

$$P_1 = \frac{RT_1}{V_1}, \quad P_2 = \frac{RT_2}{V_2} \quad (2.15)$$

Reagrupando  $P_1$  y  $P_2$  en la ecuación (2.15)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\frac{RT_1}{V_1}}{\frac{RT_2}{V_2}} = \frac{RT_1 V_2}{RT_2 V_1} = \frac{V_2 T_1}{V_1 T_2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.16)$$

Para un proceso politrópico entre los estados 1 y 2.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^n \quad (2.17)$$

Sustituyendo la ecuación (2.16) en la (2.17)

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n \frac{V_2^{-1}}{V_1^{-1}} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{V_2^{n-1}}{V_1^{n-1}} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} \quad (2.19)$$

Si elevamos ambos miembros a  $\frac{1}{n-1}$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1\left(\frac{1}{n-1}\right)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.20)$$

Sustituyendo la ecuación (2.17) en la (2.20)

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}\right]^n$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

El trabajo de compresión, a partir de las relaciones de presión y volumen, se puede calcular de la siguiente manera:

$$W = \int P dV \quad (2.21)$$

y

$$PV^n = cte$$

Para un proceso politrópico

$$W = \int c \frac{dV}{V^n},$$

integrando

$$W = c \int V^{-n} dV$$

$$W = \frac{cV_2^{1-n} - cV_1^{1-n}}{1-n}$$

Pero

$$c = P_2V_2^n = P_1V_1^n \quad (2.22)$$

Por consiguiente la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$W = \frac{P_2V_2^n (V_2)^{1-n} - P_1V_1^n (V_1)^{1-n}}{1-n}$$

$$W = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \quad (2.23)$$

Usando la ecuación de la ley de los gases ideales:

$$P_2V_2 = mRT_2 \quad y \quad P_1V_1 = mRT_1$$

$$W = \frac{mRT_2 - mRT_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad (2.24)$$

Para una compresión politrópica, el trabajo hecho, está definido por:

$$W = \frac{nR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad (2.25)$$

El trabajo de una compresión politrópica se puede escribir como:

$$T_1 = \frac{P_1 V_1}{R}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{R}$$

$$W = \frac{nR \left( \frac{P_2 V_2}{R} - \frac{P_1 V_1}{R} \right)}{1-n} = \frac{n}{n-1} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$\left[ W \left( \frac{1-n}{n} \right) = (P_2 V_2 - P_1 V_1) \right]$$

$$\frac{W(n-1)}{n} = P_1 V_1 - P_2 V_2$$

$$W = \frac{n}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) \quad (2.26)$$

Partiendo de la ecuación (2.14) donde el proceso de 1 a 2 es politrópico:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

tenemos 
$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.27)$$

De la ecuación (2.26)

$$W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left( 1 - \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} \right) \quad (2.28)$$

y de la ecuación (2.17),

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^n$$

despejando  $\frac{V_2}{V_1}$  tenemos:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{V_2}{V_1},$$

multiplicando por  $\frac{P_2}{P_1}$

$$\frac{P_1^{\frac{1}{n}} P_2}{P_2^{\frac{1}{n}} P_1} = \frac{V_2 P_2}{V_1 P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} \frac{P_2^{-\frac{1}{n}}}{P_1^{-\frac{1}{n}}} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1}$$

$$\frac{P_2^{\frac{n-1}{n}}}{P_1^{\frac{n-1}{n}}} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} \quad (2.29)$$

Sustituyendo la ecuación (2.29) en la (2.28)

$$W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

donde  $Rc = \frac{P_2}{P_1}$

$$W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[ 1 - (Rc)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (2.30)$$

### Compresor Politrópico

El proceso de compresión real opera entre una compresión adiabática e isotérmica. Los procesos actuales de compresión son politrópicos porque el gas a comprimir no es constante en la entropía como en un proceso adiabático o a temperatura constante como en un proceso isotérmico. Generalmente el compresor tiene características de operación

análogas a las bombas. Sus curvas de operación relacionan capacidad de flujo contra carga. La carga desarrollada por un fluido entre los estados 1 y 2 pueden derivarse de la ecuación general de la termodinámica:

$$H = \int_{P_1}^{P_2} \bar{V} dP \quad (2.31)$$

Donde:

$$H = \text{Carga} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

$P$  = Presión (bar abs)

$$\bar{V} = \text{Volumen específico del flujo} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

Para una compresión politrópica, las relaciones entre presión-volumen son:

$$PV^n = cte \quad \text{ó} \quad V = \frac{c_1}{P^n} \quad (2.32)$$

Donde:  $V$  = Volumen molar,  $\frac{m^3}{kg_{mol}}$

Para la carga politrópica,  $H_p$ ,  $V$  puede ser sustituido en la ecuación (2.31). La carga politrópica está definida por:

$$H_p = \int_{P_1}^{P_2} \frac{c_1}{P^n} dP \quad (2-33)$$

Integrando

$$H_p = c_1 \left( \frac{n}{n-1} \right) \left[ P_2^{\frac{n-1}{n}} - P_1^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

Multiplicando por:  $\frac{P_1^{\frac{n-1}{n}}}{P_1^{\frac{n-1}{n}}}$

$$Hp = c_1 \left( \frac{n}{n-1} \right) P_1^{\frac{n-1}{n}} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.34)$$

Donde:

$$P_1^{\frac{1}{n}} V_1 = P_2^{\frac{1}{n}} V_2 = c_1, \text{ y } Rc = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.35)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.35) en la (2.34)

$$Hp = \left( P_1^{\frac{1}{n}} V_1 \right) \left( P_1^{\frac{n-1}{n}} \right) \left( \frac{n}{n-1} \right) \left[ (Rc)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$Hp = \left[ P_1^{\left( \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n} \right)} V_1 \right] \left( \frac{n}{n-1} \right) \left[ (Rc)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$Hp = \left( \frac{n}{n-1} \right) P_1 V_1 \left[ (Rc)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.36)$$

Usando las relaciones de la Ley de los Gases

$$P_1 V_1 = \frac{Z_1 R T_1}{M} \quad (2.37)$$

$Z_1$  = Factor de compresibilidad a la succión

$T_1$  = Temperatura absoluta a la succión

$M$  = Peso molecular

$R$  = Constante Universal de los gases.

Sustituyendo la ecuación (2.37) en la (2.36)

$$Hp = \left( \frac{n}{n-1} \right) \left( \frac{Z_1 R T_1}{M} \right) \left[ (Rc)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.38)$$



Si el factor de compresibilidad a la descarga ( $Z_2$ ) es significativamente diferente al de succión ( $Z_1$ ), entonces se debe usar el factor de compresibilidad promedio ( $Z_{prom}$ ). Entonces la ecuación quedará de la siguiente manera:

$$H_p = \left( \frac{n}{n-1} \right) \left( \frac{Z_{prom} RT_1}{M} \right) \left[ (Rc)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.39)$$

### Compresor Adiabático

Por medio de los compresores recíprocos (de pistón) se comprime el aire al aspirarlo e introducirlo al cilindro por medio de la válvula de entrada, se retiene, se comprime y sale por la válvula de salida, por tal motivo se le considera como un comportamiento adiabático cerrado y que se puede medir. La definición termodinámica de un proceso adiabático requiere que no se agregue o remueva calor al sistema en el cual ocurre un cambio de estado. La carga adiabática produce las siguientes ecuaciones, las cuales son similares a las de carga politrópica, ecuación (2.39)

$$H_{AD} = \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{Z_{prom} RT_1}{M} \right) \left[ (Rc)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.40)$$

### Potencia al freno. (BHP).

Los rodamientos y las pérdidas internas del compresor producen pérdidas mecánicas que se engloban en un solo factor o rendimiento mecánico denominado potencia al freno, y es utilizado para determinar la energía necesaria medida en caballos de fuerza, para accionar el compresor, se calcula con la siguiente expresión:

$$Pot_{BHP} = \frac{wGHP}{550\eta_{adb}} \quad (2.41)$$

$\eta_{adb}$  = Eficiencia adiabática

Potencia total. Es la suma de total del número de pasos para comprimir el gas.

$$Pot_{BHP_{tot}} = \frac{wH_{1erPaso}}{550\eta_{adb}} + \frac{wH_{2doPaso}}{550\eta_{adb}}$$

---

## **3 Consideraciones Generales del Secador de Aire para Instrumentos**

El aire comprimido puede contener agua, aceite, polvo y gases indeseables, que si no se eliminan reducirán la vida útil del sistema neumático. En consecuencia debe instalarse un sistema de secado de aire para separar dichos contaminantes y de ésta manera, asegurar la operación confiable de los componentes del sistema, hasta alcanzar los niveles deseados. Para secar el aire puede recurrirse a algunos de los siguientes métodos:

### **Secado por absorción**

### **Secado por condensación (secadores refrigerativos)**

### **Secado por adsorción**

Los costos adicionales ocasionados por la instalación de un secador de aire son rápidamente amortizados debido a la disminución de los costos de mantenimiento, por tiempos de inactividad menores y por la mayor fiabilidad del sistema.

## **3.1 PROCESOS DE SECADO**

### **3.1.1 Secado por absorción**

El proceso de secado por absorción es un método puramente químico que es utilizado muy pocas veces a raíz de los elevados costos de servicio, en donde, una materia en forma gaseosa es fijada por una materia sólida o líquida.

Se basa en la diferencia de presión de vapor de agua en la fase gaseosa (agente de arrastre) y la presión de vapor del agua en solución con el delicuescente, Al entrar en solución el delicuescente, es necesario drenarlo y reponer la cantidad perdida.

Los secadores de éste tipo consisten típicamente de una cámara empacada con tabletas de un material absorbente o delicuescente, comúnmente cloruro de sodio, urea o compuestos de amonio.

Primero el aire a presión es guiado a través de un filtro para retirar la mayor cantidad de gotas de agua y de aceite posible. Cuando el aire entra en el secador, es sometido a un movimiento rotativo al atravesar la cámara de secado la cual contiene una masa de secado. La humedad se une a dicha masa de secado y la disuelve. El líquido obtenido de éste modo pasa al depósito inferior. Este depósito tiene que ser vaciado regularmente y, además, también debe sustituirse con regularidad la masa de secado.

**Ventaja del proceso de secado por absorción:**

- -Bajo costo inicial

**Desventajas del proceso de secado por absorción:**

- Reducción limitada del punto de rocío del aire comprimido.
- El consumo de material absorbente es de gran consideración.
- Existe probabilidad de acarreo de polvo del material delicuescente en el aire afluente.
- La solución del delicuescente forma una niebla que puede acarrear en forma de aerosol.
- Las tabletas pueden disolverse y formar un sólido dentro de la cámara, bloqueando el flujo del aire.

**3.1.2 Secado por condensación (secadores refrigerativos)**

El secador usado con más frecuencia es el secador por enfriamiento. En él, el aire es enfriado hasta temperaturas inferiores al punto de condensación. Cuando se enfría un gas, el agua se condensa y se drena. La humedad contenida en el aire es segregada y captada en un recipiente.

El aire que penetra en el secador por enfriamiento pasa antes por un proceso de enfriamiento previo en el que se recurre al aire frío que sale de

un intercambiador térmico. A continuación el aire es enfriado en el secador hasta alcanzar una temperatura inferior al punto de condensación.

Punto de condensación: es aquel que tiene que alcanzar el aire para que pueda condensar el agua.

Cuanto menor sea la temperatura en relación con el punto de condensación, tanto más agua condensará. El secado por enfriamiento permite alcanzar temperaturas entre los 2 °C (35.6 °F) y 5 °C (41 °F).

Un secador refrigerativo no es adecuado para muchas aplicaciones industriales comunes. Adicionalmente muchos usuarios, con objeto de disponer de mayor espacio para producción, desean que el secador se localice a la intemperie, lo que puede ocasionar problemas en las líneas de condensado y en los controles del sistema del gas refrigerante, tanto a temperaturas muy frías, como muy elevadas.

**Ventajas del proceso de secado por condensación:**

- Bajo costo inicial
- Bajo costo de operación
- No hay merma de aire comprimido.

**Desventajas del proceso de secado por condensación:**

- El punto de rocío es afectado por las fluctuaciones en el flujo de aire (es indispensable colocar un tanque de almacenamiento antes del prefiltro).
- El punto de rocío más bajo es +35 °F (1.6 °C) a +50 °F (10 °C) en la práctica.
- El sistema de aire tiene riesgo de congelación.
- No es apto para instalarse a intemperie y en muchos ambientes industriales

**3.1.3 Secado por adsorción (regenerativos)**

Estos secadores reducen el punto de rocío adsorbiendo el vapor de agua presente en el aire comprimido sobre la superficie del desecante. La adsorción ocurre hasta que se alcanza el punto de equilibrio entre la

---

presión parcial del vapor de agua en el aire y en la superficie del desecante.

El desecante puede ser regenerado al remover (deadsorber) el agua recogida en la superficie.

### 3.2 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DEL SECADOR

#### 3.2.1 Calculo de la carga de humedad para la selección del secador

El primer paso es obtener datos de las cantidades que serán de nuestra utilidad, y que se encuentran en el capítulo 1, incisos 1.1.7 y 1.1.10, como son:

Gasto volumétrico estándar ( $Q_s$ ) = 100 SCFM

Como existe una pérdida +/- del 15% de gasto por concepto de purga en la regeneración del secador de aire, por lo tanto:

$$V_o = 100 + (15\%) = 115 \text{ SCFM}$$

El valor resultante anterior de 115 SCFM, es valor dado por las necesidades del proceso.

Gasto volumétrico estándar ( $Q_s$ ) = 115 SCFM

Presión ( $P$ ) = 14.7 PSIA

Temperatura ( $T$ ) = 80 °F

Humedad relativa ( $H_r$ ) = 80%

Humedad calculada a la entrada del compresor

$$\frac{H}{t} = (Q)(H_r)(H_s)$$

En donde:

$\frac{H}{t}$  = Humedad en el aire por minuto medida en granos de vapor de agua

por minuto ( $Gr/min$ )

Humedad relativa  $Hr = 80\%$

Gasto volumétrico real ( $Q_a$ )

### Calculo del gasto volumétrico real.

Este se calcula con la ecuación (2.8) y con los datos de condiciones de entrada.

$$\frac{P_{entrada} V_{actual}}{Z_{actual} T_{entrada}} = \frac{P_{std} V_{std}}{Z_{std} T_{std}}$$

$$V_{actual} = \frac{P_{std}}{P_{entrada}} \times \frac{T_{entrada}}{T_{std}} \times \frac{Z_{actual}}{Z_{std}} \times V_{std}$$

$$V_{actual} = \frac{14.7 \text{ lb/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 / 1 \text{ ft}^2}{14.7 \text{ lb/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 / 1 \text{ ft}^2} \times \frac{539.67 \text{ }^\circ R}{518.67 \text{ }^\circ R} \times 1.0 \times 115 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

$$V_{actual} = \frac{131372947.44}{1097920.66} = 119.66 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

Gasto volumétrico real ( $Q_a$ ) =  $119.66 \approx 120$

El contenido de humedad de saturación del aire, obtenido de la tabla del Anexo C a  $80 \text{ }^\circ F$ :

$H_s = 11 \text{ Gr/min}$

$$\frac{H}{t} = (120) (0.8) (11) = 1056 \text{ Gr/min.}$$

Humedad disuelta después del filtro coalescente; (carga que entra al secador) en donde  $T_2$  y  $P_2$  son la temperatura y la presión a la salida del compresor.

$T_2 = 330.7 \text{ }^\circ F$

$P_2 = 164.67$

$$\frac{H}{t_2} = (Q_2)(Hr_2)(Hs_2)$$

Si  $Q_2 = V_2$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Despejando  $V_2$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1 T_2}{T_1 P_2}$$

Sustituyendo

$$V_2 = \left( 120 \text{ ft}^3 / \text{min} \right) \left( \frac{2116.8 \text{ lb} / \text{ft}^2}{80 \text{ }^\circ\text{F}} \right) \left( \frac{330.71 \text{ }^\circ\text{F}}{23716.8 \text{ lb} / \text{ft}^2} \right)$$

$$V_2 = 44.28 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

El contenido de humedad de saturación del aire, se obtiene de la tabla del Anexo C a 100 °F que es la temperatura a la salida del postenfriador:

$$Hs_2 = 20.5 \text{ Gr} / \text{ft}^3$$

La humedad relativa en el punto a la entrada del secador equivale a 100 % (aire saturado) ya que el aire ambiental, al comprimirse a presiones de este nivel, siempre queda sobresaturado.

$$Hr_2 = 100 \%$$

La humedad del aire en el punto de entrada del secador,  $H_2$  es:

$$\frac{H}{t_2} = (44.28)(1)(20.5)$$

$$\frac{H}{t_2} = 907.74 \text{ Gr} / \text{min}$$

La diferencia en contenidos de humedad entre los puntos de la toma del compresor y en la entrada al secador, se explica por la sobresaturación, condensación y drenaje de la humedad, consecutivamente en el separador (después del postenfriador), tanque y prefiltro.

### 3.2.2 Cálculo del contenido de humedad después de usar diferentes sistemas de secado.

El cálculo sirve para comparar la eficiencia en términos de porcentaje de humedades absolutas removida del aire, obtenidas a partir de la humedad absoluta en la entrada y su diferencia a la salida de cada uno de los secadores a comparar: delicuescente, refrigerativo y de adsorción.

#### Caso I. A la salida de un secador delicuescente:

Las condiciones de entrada son:

Gasto	44.28 <i>ACFM</i>
Presión	164.67 <i>PSI</i>
Temperatura	100 ° <i>F</i>
Carga de humedad	907.74 <i>Gr/min</i>

Puesto que un secador delicuescente proporciona típicamente un punto de rocío en el efluente de 10°F a 15 °F abajo del que tiene el aire a la entrada, el punto de rocío a la salida será 80 °F, en el mejor de los casos.

De acuerdo con esto, las condiciones a la salida serán:

Punto de rocío	80 ° <i>F</i>
Gasto	44.28 <i>ACFM</i>
Presión	164.67 <i>PSIG</i>
$H_{s3}$	11 <i>Gr/ft<sup>3</sup></i>

$$\frac{H}{t_3} = (Q_3)(Hr_3)(Hs_3)$$

$$\frac{H}{t_3} = 487.08 \text{ Gr/min}$$

Para darse una idea más concreta lo convertimos a galones por 24 horas (*Gal / 24 hrs*) de trabajo continuo, suponiendo 3 turnos:



$$\frac{Gal}{24hrs} = (487.08 Gr/min) \left( \frac{1lb}{7000Gr} \right) \left( \frac{60min}{hrs} \right) \left( \frac{24hrs}{1dia} \right) \left( \frac{1gal}{8.33lb} \right)$$

$$\frac{H}{t_3} = 12.03 Gal/24hrs$$

Esta es la cantidad disuelta en el aire después de un secador delicuescente.

### **Caso II. A la salida de un secador refrigerativo**

Las condiciones a la entrada serían exactamente las mismas que en el caso I

Como un secador refrigerativo puede proporcionar un punto de rocío en el efluente de 35 °F, las condiciones a la salida serán:

Punto de rocío	35 °F
Gasto	44.28 ACFM
Presión	100 PSI
Carga de humedad de saturación $H_s$	2.2 Gr/ft <sup>3</sup>

Usando la misma fórmula:

$$\frac{H}{t_4} = (44.28)(1)(2.2)$$

$$\frac{H}{t_4} = 97.42 Gr/min$$

Haciendo una conversión a galones de agua / 24 horas

$$2.4 Gal/24hrs$$

### **Caso III. A la salida de un secador de adsorción**

Las condiciones a la entrada del secador son las mismas que en los casos I y II.

Para las condiciones a la salida, el punto de rocío requerido de  $-40\text{ }^{\circ}F$  y sin caída de presión.

Gasto	44.28 <i>ACFM</i>
Presión	100 <i>PSIG</i>
Punto de rocío	$-40\text{ }^{\circ}F$
Carga de humedad Hs	0.04 <i>Gr/ft<sup>3</sup></i> de la tabla del anexo C

$$\frac{H}{t_5} = (44.28)(1)(0.04)$$

$$\frac{H}{t_5} = 1.77 \text{ Gr/min}$$

$$\frac{H}{t_5} = 0.044 \text{ Gal/24hrs}$$

#### Caso IV Comparando la eficiencia de secado en los tres sistemas

En la Tabla 3.1, para el mismo problema de 120 *SCFM* a  $164.7\text{ }^{\circ}F$  y 100 *PSIG* en *Gr/min*, se muestran las diferencias del cálculo de contenido de humedad a la salida de los sistemas de secado en los casos anteriores:

Humedades	Delicuesente	Refrigerativo	Adsorción
En la entrada	907.64	907.74	907.64
En la salida	487.08	97.42	1.77
Separación	420.66	810.32	905.97
Eficiencia	46.34%	89.26%	99.8%

Tabla 3.1 Tabla de comparación de humedad secado de los tres sistemas

De acuerdo a la Tabla 3.1, el secado por adsorción es el más eficiente, ya que la humedad del aire seco, es cercana al 100%.

### **3.3 SECADO POR ADSORCIÓN**

Esencialmente, el proceso de adsorción involucra una adhesión física entre la superficie del desecante y el vapor de agua, el cual se condensa en forma de una película muy delgada sobre la superficie de los poros del desecante. No existen interacciones químicas. La adsorción es un fenómeno reversible y selectivo.

Un adsorbente, también llamado desecante, es una materia muy resistente físicamente y químicamente inerte, extremadamente poroso, que permite la adsorción de un gran volumen de agua en una cantidad relativamente pequeña.

La adsorción ocurre durante el lapso en que se mantiene en contacto el adsorbente con el adsorbato, hasta que la presión de vapor del adsorbato sobre el desecante sea igual a la presión de vapor del adsorbato (agua) en el aire húmedo, alcanzando el equilibrio.

#### **3.3.1 Regeneración.**

Una de las mayores ventajas de un adsorbente es la posibilidad de reactivarlo o regenerarlo. El proceso de adsorción es reversible.

Muy a menudo el periodo de regeneración se inicia cuando el lecho que seca el fluido alcanza una condición de equilibrio igual al máximo aceptable de concentración de adsorbato. En sistemas de doble cámara, se alterna la entrada del gas húmedo al lecho ya reactivado mediante una válvula de diversificación o una serie de válvulas. Simultáneamente se hace fluir gas caliente y/o seco a contracorriente a través del lecho saturado que acaba de efectuar el secado, hasta que el agua es acarreada y purgada.

#### **3.3.2 Desecantes.**

Son muy importantes sus características físicas; deben ser fuertes para resistir la fricción debida al movimiento causado por el flujo, lo mismo que para soportar el peso estático del lecho. No deben ser afectados por contaminantes y deben ser químicamente inertes a los fluidos que manejen.

Por otra parte, es deseable que la caída de presión sea baja cuando el aire circule a través del lecho formado por el desecante.

### 3.3.2.1 Tipos de desecantes.

**Silica gel granular** No es recomendable para estar en contacto con álcalis fuertes o para ácido sulfúrico. Al estar en contacto con agua líquida se destruye rápidamente, lo que hace riesgosa su utilización para nuestros propósitos.

**Sílica gel modificada tipo perla.** Tampoco debe usarse en contacto con álcalis o con HF. El rango recomendado para temperaturas de regeneración es de 300 °F a 500 °F.

**Alúmina activada.** Es un hidróxido de aluminio ( $Al_2 O_3$ ) de forma porosa. A medida que el aire circula por la alúmina, el agua se adhiere a la superficie de este material regenerativo.

A temperatura ambiente la alúmina activada para el agua se compara con la silica gel pero la capacidad de la alúmina activada es mayor que la silica gel, y es comúnmente usada como desecante para secado de aire caliente o vapores de gas.

### 3.3.3 Fuerzas y energías de adsorción.

Se llama adsorción al fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente. El proceso inverso de la adsorción es la desorción.

Son muchos los tipos de adsorción existentes (sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas..), pero esta práctica se ceñirá al estudio de la adsorción sólido-líquido. Los sólidos son capaces de adsorber uno o más componentes de una mezcla líquida, o bien el soluto o el disolvente de una solución.

La adsorción física es la más frecuente, mientras que la quimisorción se manifiesta, únicamente, cuando el adsorbente y el adsorbato tienden a formar un compuesto.

La adsorción es la transferencia de un soluto en un gas o líquido (adsorbato) hacia la superficie de un sólido (adsorbente) en donde el soluto es retenido como resultado de

atracciones intermoleculares con las moléculas sólidas. Este proceso es muy semejante al de absorción, con la diferencia de que en lugar de mezclarse completamente en la otra fase para estar en forma homogénea en su nuevo estado, simplemente se adhiere a la superficie del sólido adsorbente.

Las fuerzas que intervienen en los fenómenos de adsorción son distintas de las que se encuentran en las reacciones químicas y en los compuestos químicos ordinarios.

Las fuerzas de interacción entre el adsorbente y el adsorbato reciben el nombre de fuerza de Van der Waals las cuales se caracterizan por ser débiles comparadas a los vínculos químicos normales.

Si el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de fuerzas de Van der Waals, se trata de Adsorción Física. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos, apenas unas cuantas Kilocalorías, comparables al calor de vaporización del adsorbato. El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción.

#### **3.3.4 Mallas moleculares (Molecular Sieve).**

Estas sustancias son sintéticas y se presentan como perdigones cilíndricos o perlas esféricas. Se hallan disponibles en grados, siendo sus designaciones: 3A, 4A, 5A y 13A. La familia A es la de aluminosilicato metálico cristalino cúbico simple. La familia tipo X es similar, pero con cuerpo de tipo centro cúbico. El número que antecede a la letra indica el tamaño de poro expresado en Angstrom (Å). Los tamaños de poros son importantes porque permiten que las moléculas más pequeñas penetren la malla, dejando las moléculas más grandes.

El tipo 3A se usa principalmente para separar hidrocarburos insaturados, nitrógeno y alcoholes polares. El tipo 4A, que es el tipo deshidratante más universal, se recomienda para gases de baja humedad relativa. El 5A se usa para separación de parafinas, a partir de hidrocarburos mezclados y para quitar H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y mercaptano etílico presentes en el gas natural. El tipo 13X es ampliamente usado para separar el CO<sub>2</sub> y el agua presentes en el aire y para "endulzar" gas propano licuado. Se recomiendan temperaturas de regeneración de 400 a 600 °F para todos los tipos.

### 3.3.5 Tipos de secadores de adsorción.

Mediante los secadores de adsorción, reactivados en frío o en caliente, se pueden eliminar:

- -Dióxido de carbono, que se encuentre presente en el aire, hidrógeno, nitrógeno, gas natural o en algunos hidrocarburos.
- -Oxígeno que se halle en solución en el nitrógeno o en algunos gases raros.
- -Amoniaco que contamine al aire, al hidrógeno, al monóxido de carbono, al nitrógeno o al metano.

Casi todos los secadores de adsorción o regenerativos consisten de dos cámaras con desecante. En algunos diseños, el gas húmedo fluye en dirección ascendente, en otros, en dirección descendente.

En la modalidad de flujo descendente, para obtener mayor economía en el costo de las cámaras, se pueden utilizar ciclos más cortos, lo que permite usar, a su vez una menor cantidad de desecante. Esto solo fue factible al mejorar la calidad de las válvulas diversificadoras, debido al incremento en su frecuencia de uso.

La Figura 3.1 ilustra la operación de un secador. El aire húmedo que debe ser saturado, entra a la cámara izquierda en donde se separa la humedad, después de lo cual, ya seco, sigue su camino por la conexión de salida.

Una porción del aire seco es desviada hacia la cámara derecha para regenerar al desecante que se encuentra con la humedad que separó en el paso anterior. El aire seco pasa a través del lecho, saturándose nuevamente al recoger la humedad.

Nótese que el flujo de regeneración es de dirección opuesta al flujo de secado. Es más eficiente separar el agua en dirección contraria a aquélla en que se depositó.

Durante su operación, un secador cambia alternadamente, secando en una cámara mientras la otra se regenera.

Las técnicas de secado son similares en todos los tipos de equipos de secado. El método de regeneración es el que cambia de tipo a tipo donde

se pueden encontrar dos tipos básicos: con o sin calentamiento (en frío). El método por calentamiento es el más antiguo, siendo el tipo de calentamiento interno el más común para las unidades de menor capacidad (hasta 1000 *SCFM* a 100 *PSIG*).

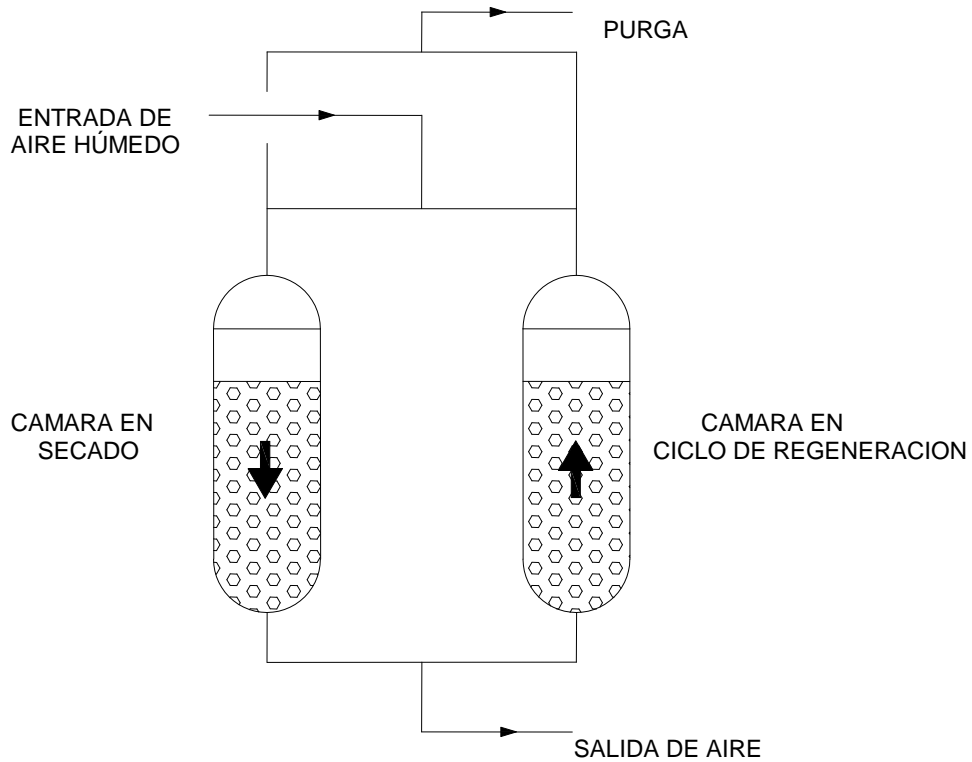


Figura 3.1 Operación de un secador de adsorción

### 3.3.5.1 Regeneración por calor interno.

Se usan normalmente dos cámaras que contienen cada una, uno o varios calentadores, enfundados, dentro del lecho del desecante. Mientras que una cámara está en operación, el desecante de la otra torre está siendo reactivado. El ciclo completo de secado y reactivación dura de 8 a 16 horas en los secadores reactivados en caliente.

Las dos fuentes principales de calor son la energía eléctrica y el vapor. Los calentadores de vapor ya no son recomendables.

Este tipo de secadores es recomendable para gastos medios: para gastos volumétricos reducidos (menores a 150 *SCFM* a 100 *PSIG*).

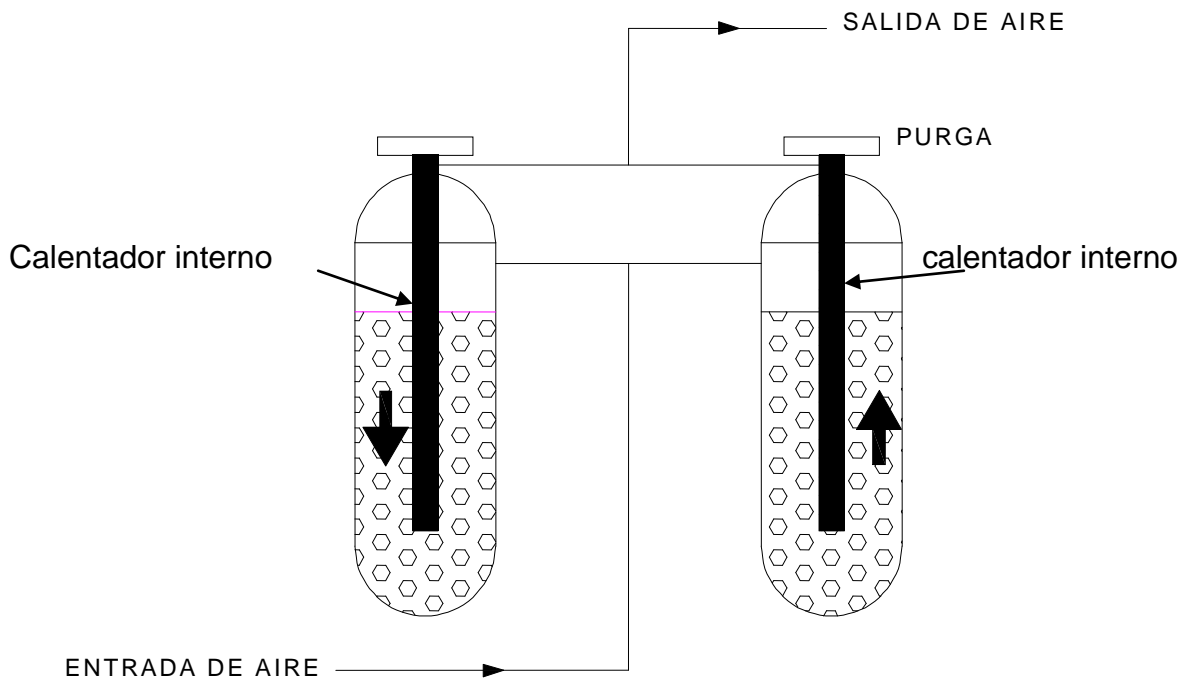


Figura 3.2 Diagrama de un secador con regeneración de calentamiento interno

En la figura 3.2 dos torres que contienen desecante. Mientras que en una torre las partículas del desecante adsorben la humedad del aire, el desecante saturado se regenera en la otra. Después de medio ciclo, se invierten las funciones de las torres.

Fase de adsorción/secado. El aire comprimido húmedo entra a la torre de secado a través de la válvula de aspiración. El aire fluye a través de las partículas de adsorbente, donde se adsorbe la humedad. El aire seco abandona la torre a través de la válvula de salida.

Fase de regeneración. El aire continúa a través del calentador interno; el aire calentado se recorre el lecho del desecante saturado, donde expulsa la humedad adsorbida en las partículas de desecante. El aire caliente ya húmedo abandona la torre por la parte superior; esto continúa hasta que el sensor de temperatura desconecta el calentador.

Después, el aire comprimido seco se usa para enfriar el lecho de desecante.



### 3.3.5.2 Secadores con calentamiento externo.

En éste tipo de regeneración, el aire para reactivar el desecante se toma de la atmósfera mediante un soplador y se calienta antes de entrar a la cámara. No se utiliza para nada el aire comprimido. Este tipo de secador se emplea para gastos volumétricos de 500 *SCFM* y mayores. No hay merma de aire comprimido y la caída de presión a través del secador es pequeña (de 3 psi como máximo). Obviamente, está restringido a secar solamente aire comprimido, ya que, contaminaría a cualquier otro gas.

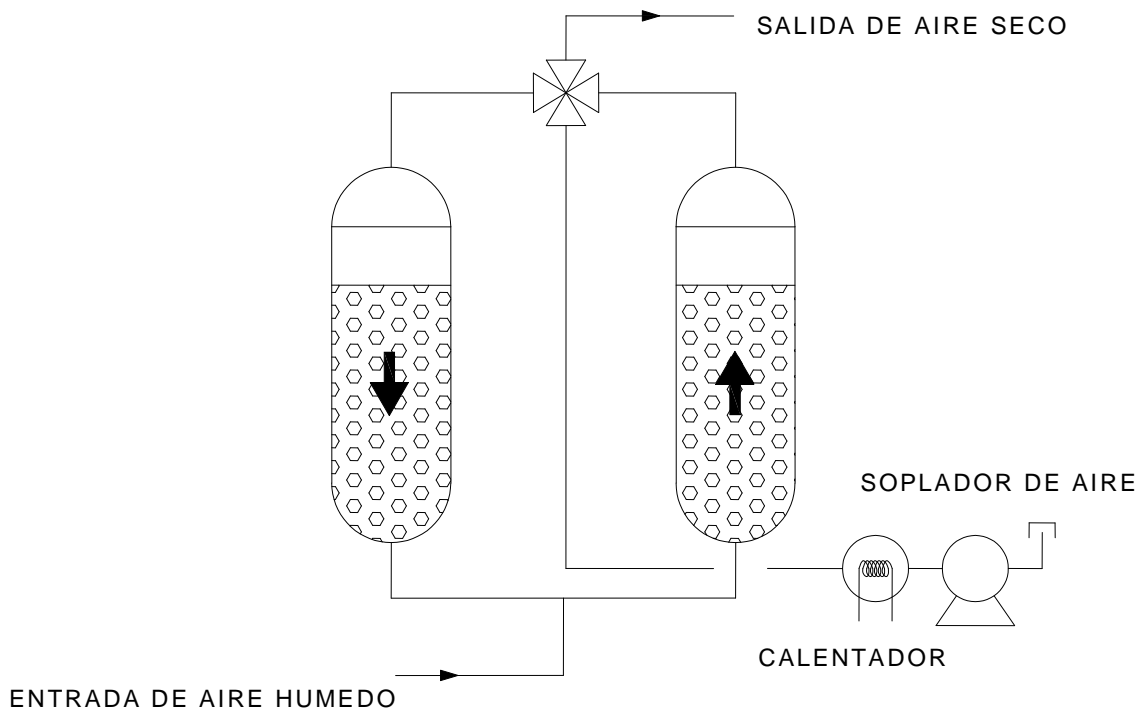


Figura 3.3 diagrama de un secador con calentamiento externo

En la figura 3.3 en la torre derecha se efectúa el secado de aire húmedo pasando por el desecante donde es retenida la humedad, el desecante saturado se regenera en la otra. Después de medio ciclo, se invierten las funciones de las torres.

El aire seco abandona la torre a través de la válvula de salida.

Aire ambiental es succionado por el soplador de aire haciéndolo pasar por el calentador hasta 450 °F. El aire caliente de purga extrae humedad retenida en el desecante y es expulsado hacia la atmósfera.

### **3.3.5.3 Regeneración en circuito cerrado.**

Este método de regeneración se usa frecuentemente para gastos grandes de gas, cuando no es aplicable el tipo de ventilador atmosférico o cuando el escape del gas de purga no es aceptable a causa de su valor o de su toxicidad.

Existe una restricción para éste tipo de regeneración. Para que pueda emplearse la corriente lateral de purga, el gasto de aire húmedo a la entrada no puede bajar a un porcentaje menor que el que se toma para purga, que es aproximadamente 20%.

Se dispone comercialmente de secadores de circuito cerrado desde 500 *SCFM* (a 100 *PSIG* y 100°F) en adelante; no hay merma en el aire comprimido y la caída de presión es típicamente de 8 *PSI* a través del equipo.

### **3.3.5.4 Regeneración en frío (secadores tipo heatless).**

El principio de los secadores de adsorción sin calor por regeneración mediante el aire de purga, se basa en la propiedad física del desecante, en adsorber y desadsorber el vapor de agua.

El secador tipo heatless es una tecnología sencilla en donde se toma una fracción del aire comprimido secado previamente en una de las dos torres con las que cuenta el secador, y lo envía a la torre en proceso de regeneración, adsorbiendo el agua depositada en el elemento desecante.

No se requiere calor externo para reactivar al desecante. Dado que el ciclo es muy corto, el calor residual de adsorción, en conjunto con la purga de gas a baja presión, es suficiente para regenerar el lecho y por lo tanto, para proporcionar puntos de rocío muy bajos en el afluente, durante el subsecuente periodo de secado.

Se pueden diseñar secadores regenerados en frío para gastos volumétricos hasta de 10000 *SCFM* y aún mayores y el gasto de purga necesario, considerando una presión a la entrada de 100 *PSIG*, es del orden del 15% del gasto de entrada. La caída de presión a través de estos secadores es de 5 *PSI* típicamente a capacidad máxima.

---

## 4 Selección y cálculo del paquete de aire de instrumento

La elección correcta del compresor es esencial para garantizar que se tenga siempre la cantidad y calidad deseadas de aire comprimido al costo más bajo posible, mayor fiabilidad y menor mantenimiento, el punto de partida esencial es la aplicación.

Si su aplicación exige aire de proceso o de producción, el principal factor para tomar la decisión será la localidad y ausencia de humedad del aire comprimido. La carga de trabajo y la jornada laboral establecerán el tipo de equipo. El aire contaminado de aceite procedente de los compresores con inyección de aceite se puede mejorar haciéndolo pasar a través de filtros de varias etapas. Sin embargo, es esencial evaluar las limitaciones de calidad, los riesgos y los consiguientes costos energéticos de ésta opción. El vapor de aceite destruye la capacidad del sistema de secado de remover la humedad del flujo de aire. El aceite contenido en el flujo de aire contaminará eventualmente las partes desecantes del sistema de secado haciéndolo inservible. Los compresores lubricados demandan un mantenimiento regular ya que requieren de cambios de aceite programados. Y como expelen aceite de manera constante es necesario verificar (y añadir) los niveles de aceite de modo regular. Un compresor exento de aceite elimina la necesidad de filtros, traduciéndose en unos menores costos de explotación, ya que el sistema funciona a una presión de trabajo menor y con menos mantenimiento.

Utilizando un secador que produzca unos puntos de rocío a presión por debajo de cero sin ninguna pérdida de aire comprimido y empleando el propio calor residual del compresor para la regeneración del secador, se reducen los costos aún más. Por otro lado la solución idónea también debe perseguir la protección del medio ambiente.

La producción de aire comprimido crea cada año unos 30 millones de litros de aceite ácido, contenido en los condensados. Por lo cual se utilizan compresores no lubricados con aceite con un secador de adsorción.

Esta combinación exclusiva proporciona condensados sin aceite, suprimiendo el problema de su eliminación. Se reducen las pérdidas de presión y por lo tanto se necesita menos energía. Y esto también se traduce en una menor contaminación atmosférica.

Los compresores comerciales no lubricados con aceite se clasifican en: RECIPROCANTES, DE TORNILLO Y CENTRÍFUGOS.

#### 4.1 CALCULO DEL COMPRESOR

1. Partimos de las necesidades de gasto volumétrico requerido en la red de aire para instrumentos dadas en párrafo 1.6.2 del capítulo 1:

$$\text{Volumen Estándar } SCFM = 100 \text{ SCFM.}$$

$$\text{Presión entrada } P_1 = 14.7 \text{ PSIA}$$

$$\text{Temperatura entrada } T_1 = 80^\circ \text{ F} = 539.67 \text{ }^\circ\text{R}$$

Condiciones estándar

$$P_{std} = 14.7 \text{ PSIA}$$

$$T_{std} = 59^\circ \text{ F} = 518.67 \text{ }^\circ\text{R}$$

Presión de descarga

$$P_2 = 164.7 \text{ PSIA}$$

$$k = 1.4$$

$$\text{Factor de compresibilidad del aire } (Z_1 = Z_2) = 1$$

$$R = 1545.32 \frac{\text{ft lbf}}{\text{lbmol } ^\circ\text{R}}$$

Como existe una pérdida +/- del 15% de gasto por concepto de purga en la regeneración del secador de aire, por lo tanto:

$$V_o = 100 + (15\%) = 115 \text{ SCFM}$$

El valor resultante anterior de 115 SCFM, es valor dado por las necesidades del proceso.

2. Cálculo del flujo másico “w”.

Este se calcula por medio de la ecuación 1.10, con las condiciones estándar:

$$PoVo = m_2 RT_o$$

$$m_2 = \frac{PoVo}{RT_o}$$

$$W = \frac{(14.7 \text{ lb/in}^2)(144 \text{ in}^2 / 1 \text{ ft}^2)(115 \text{ ft}^3 / \text{min})}{\left( \frac{1545.32 \text{ lb} \cdot \text{ft} / \text{lb}_{\text{mol}} \cdot \text{R}}{28.96} \right) (539.67 \text{ R})}$$

$$w = \frac{243432}{28796.79} = 8.45 \text{ lb} / \text{min}$$

3. Cálculo del volumen actual (real).

Este se calcula con la misma ecuación (2.8) y con los datos de condiciones de entrada.

$$\frac{P_{\text{entrada}} V_{\text{actual}}}{Z_{\text{actual}} T_{\text{entrada}}} = \frac{P_{\text{std}} V_{\text{std}}}{Z_{\text{std}} T_{\text{std}}}$$

$$V_{\text{actual}} = \frac{P_{\text{std}}}{P_{\text{entrada}}} \times \frac{T_{\text{entrada}}}{T_{\text{std}}} \times \frac{Z_{\text{actual}}}{Z_{\text{std}}} \times V_{\text{std}}$$

$$V_{\text{actual}} = \frac{14.7 \text{ lb/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 / 1 \text{ ft}^2}{14.7 \text{ lb/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 / 1 \text{ ft}^2} \times \frac{539.67 \text{ R}}{518.67 \text{ R}} \times 1.0 \times 115 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

$$V_{\text{actual}} = \frac{131372947.44}{1097920.66} = 119.66 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

4. Cálculo de la temperatura de descarga

$$T_{\text{sal}} = T_2 = T_1 (Rc)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_2 = 539.67 \text{ R} \left[ \frac{164.7 \text{ lb/in}^2}{14.7 \text{ lb/in}^2} \right]^{\left[ \frac{1.4-1}{1.4} \right]}$$

$$T_2 = 539.67 \text{ R} (11.2)^{\left[ \frac{1.4-1}{1.4} \right]}$$

$$T_2 = 1076304 \text{ R} = 616.63 \text{ F}$$

La temperatura máxima probable no debe exceder mucho mas de  $360^{\circ}F$  ( $182^{\circ}C$ ). Por lo que se considera que la compresión debe realizarse en por lo menos dos etapas, colocando un ínter enfriador, por medio de agua entre etapas, donde la  $T_{post-enfr.} = 100^{\circ}F$ .

$$T_{sal\ 1er\ Paso} = T_1 (\sqrt[k]{Rc})^{k-1}$$

$$T_{sal\ 1er\ Paso} = 539.67^{\circ}R \left[ \sqrt[1.4]{\frac{164.7\ lb/in^2}{14.7\ lb/in^2}} \right]^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$T_{sal\ 1er\ Paso} = 762.13^{\circ}R = 302.46^{\circ}F$$

$$T_{sal\ 2o\ Paso} = T_2 = T_1 (\sqrt[k]{Rc})^{k-1}$$

$$T_{sal\ 2o\ Paso} = T_2 = 559.67^{\circ}R \left[ \sqrt[1.4]{\frac{164.7\ lb/in^2}{14.7\ lb/in^2}} \right]^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$T_{sal\ 2o\ Paso} = T_2 = 790.38^{\circ}R = 330.71^{\circ}F$$

Esta temperatura es aceptable por lo tanto se acepta la compresión en dos etapas.

5. Cálculo de las cargas aplicando las ecuaciones 2.40

$$H_{1er\ paso} = \frac{(1.0) \left( \frac{1545.32\ lb - ft/lb_{mol} - ^{\circ}R}{28.96} \right) (7621.13^{\circ}R - 1539.67^{\circ}R)}{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$H_{1er\ paso} = 4149265\ lb - ft / lb_{mol}$$

$$H_{2do\ paso} = \frac{(1.0) \left( \frac{1545.32\ lb - ft/lb_{mol} - ^{\circ}R}{28.96} \right) (790.38^{\circ}R - 559.67^{\circ}R)}{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$H_{2do\ paso} = 4303052\ lb - ft / lb_{mol}$$

6. Cálculo de la potencia al freno utilizando la ecuación 2.41 si  $\eta_{adb} = 0.75 @ 0.78 \approx 0.76$

$$Pot_{BHP \text{ 1er Paso}} = \frac{(7.36 \text{ lb/min})(1 \text{ min}/60 \text{ seg})(41492.65 \text{ lb} \cdot \text{ft} / \text{lb}_{\text{mol}})}{(550)(0.76)}$$

$$Pot_{BHP \text{ 1er Paso}} = 12.10 \text{ BHP}$$

$$Pot_{BHP \text{ 2do Paso}} = \frac{(7.36 \text{ lb/min})(1 \text{ min} / 60 \text{ seg})(43030.52 \text{ lb} \cdot \text{ft} / \text{lb}_{\text{mol}})}{(550)(0.76)}$$

$$Pot_{BHP \text{ 1er Paso}} = 12.55 \text{ BHP}$$

$$Pot_{BHP \text{ Tot}} = Pot_{\text{motor}} = 12.10 \text{ BHP} + 12.55 \text{ BHP}$$

$$Pot_{BHP \text{ Tot}} = Pot_{\text{motor}} = 24.65 \text{ BHP} \approx 25 \text{ BHP}$$

Por lo tanto se requiere un motor comercial de 25 HP.

## 4.2 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL SECADOR REGENERATIVO.

La primera consideración es el tipo de lubricación del compresor; si este tiene aceite la mejor recomendación es el secador regenerado en frío; si es exento de aceite, cualquier tipo es aplicable.

El segundo punto a considerar es el punto de rocío requerido, de acuerdo con la aplicación; si debe ser menor a  $+35^{\circ}F$  (referido a presión de operación), quedará descartado el secador refrigerativo, lo mismo si la instalación será a la intemperie o habrá fibras y ciertos gases corrosivos en el aire lo cual es aplicable ya que el equipo estará dentro de un ambiente marino o refinería.

Este tipo de secadores es el más comúnmente empleado en la industria. Entre sus mayores beneficios están los siguientes:

- Diseñado usualmente para suministrar un punto de rocío de  $-40^{\circ}F$  a presión estándar.
- Se pueden alcanzar puntos de rocío hasta de  $-100^{\circ}F$  con diseños también estándar.

- Bajo costo de adquisición.
- No cuenta con componentes tales como calentadores, ventilador, válvulas especiales, etc., que son comunes en los otros tipos de secadores.
- Bajo costo de mantenimiento, porque hay menos componentes que se descompongan.
- Larga vida de servicio. Existen unidades construidas hace más de 20 años, que siguen operando.
- Menor corrosión debido a que no existe aumento de temperatura de operación.
- Larga vida útil del desecante por estar sometido a menores cambios de temperatura.
- Puede operar en ciclos fijos y es recomendable para capacidades medias.

La Tabla 1 del anexo D muestra las diferencias entre los tipos de secadores más usuales para diferentes conceptos, así como sus principales limitaciones.

De acuerdo con la Tabla 1 del anexo D, la recomendación tanto técnica como comercial para la selección del paquete de secado de aire para instrumentos de la plataforma de enlace E-KU-A2 es el tipo regenerado en frío (Heatless).

#### **4.2.1 Principio de operación de un secador regenerado sin calor**

Los secadores regenerados sin calor utilizan la tendencia natural de los desecantes para permanecer en equilibrio con su alrededor. Durante el ciclo de secado, el desecante adsorbe humedad del flujo del gas entrante. Durante el ciclo de regeneración una pequeña porción del gas ya seco es pasado por el desecante a presión atmosférica, creando un ambiente en el cual el desecante entregará la humedad previamente adsorbida hasta alcanzar el equilibrio.



El gas húmedo (aire) pasa a través de una válvula de 4 vías; el gas es forzado a fluir a través de una torre llena de agente químico que tiene avidez por la humedad, al salir de la torre el gas sale seco.

La regeneración se logra principalmente por un cambio espontáneo de presión (despresurización) creándose un vacío. Al ocurrir este cambio toda la humedad saturada retenida en los poros higroscópicos, del elemento desecante es arrastrada a la atmósfera. La humedad que no se eliminó durante la despresurización es arrastrada por el aire de barrido (purga de regeneración). La cantidad de aire de purga necesaria es del 3 al 10 % del fluido utilizado en el secador.

En la Figura 3.5 el aire húmedo que entra al secador, se seca en la cámara izquierda y sale como aire seco. Al efectuarse el secado hay desprendimiento de calor que se acumula en el lecho del desecante. Dicho en otra forma, la adsorción es un proceso exotérmico o un proceso en el que se produce calor.

La cámara derecha, se regenera por el paso de una porción pequeña de aire seco que proviene de la cámara izquierda. El aire seco, junto con el calor de adsorción depositado en el ciclo previo, extrae la humedad del desecante y se descarga a la atmósfera.

Las cámaras de un secador regenerado en frío se alternan para secar cada 2,3, o 5 *minutos*, según la dirección del flujo y el punto de rocío específico. La frecuencia tan corta de estos cambios es necesaria porque el calor de adsorción debe almacenarse y no debe permitirse que se disipe.

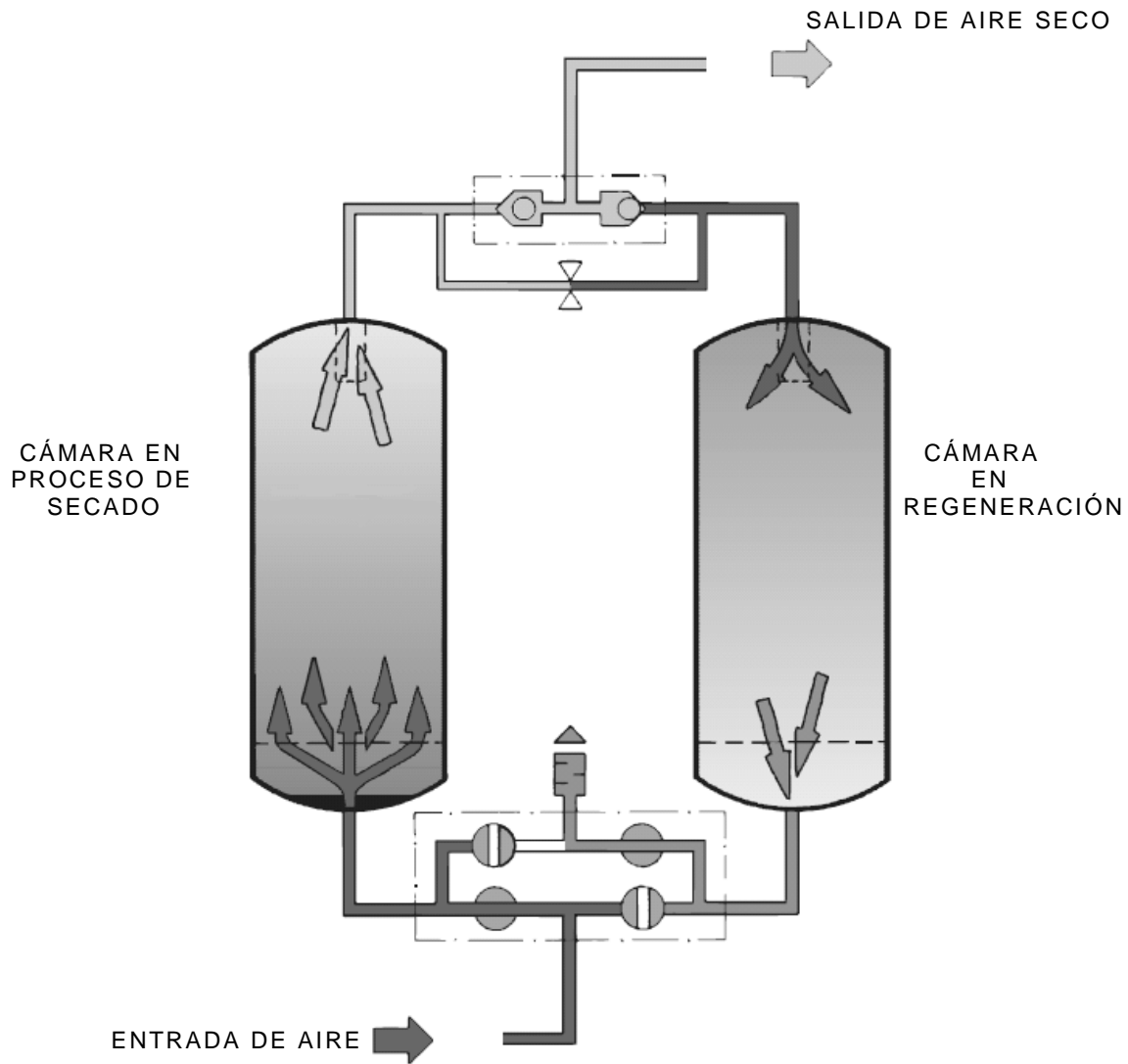


Figura 3.5 Diagrama de un secador con regeneración en frío

#### 4.2.2 Cálculo de la carga del desecante.

Para propósitos únicamente de diseño, los procedimientos para determinar la cantidad de desecante se basa en una capacidad de adsorción del 15% en peso: (*Lb* de agua / *Lb* de desecante).

Según la expresión:

$$ACFM = SCFM \left( \frac{Pa}{Pw + Pa} \right) \left( \frac{Tw + 460}{Ta + 460} \right) \quad (4.1)$$

En donde:

$$ACFM = Ft^3/min \text{ A condiciones de operación}$$

$$SCFM = Ft^3/min \text{ A condiciones estándar}$$

$$Pa = \frac{kg}{cm^2} \text{ Presión atmosférica (14.7 PSIA) a nivel de mar.}$$

$$Pw = \frac{Kg}{cm^2} \text{ Presión de trabajo (PSIG)}$$

$$Ta = ^\circ F \text{ Temperatura de referencia}$$

$$TW = ^\circ F \text{ Temperatura de trabajo.}$$

Aplicando la expresión 4.1:

$$ACFM = (375) \left( \frac{14.7}{100+14.7} \right) \left( \frac{100+460}{60+460} \right)$$

$$ACFM = (375)(0.128)(1.077)$$

$$ACFM = 52.696 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

Para obtener la cantidad de humedad que se va a sustraer aplicamos la siguiente fórmula:

$$Lb.h_2 o = ACFM \left( \frac{1lb}{7000gr} \right) gr .humedad$$

$$\therefore Lb.h_2 o = 52.696 \left( \frac{1}{7000} \right) (4) (20.5)$$

$$Lb.h_2 o = 36.34lb$$

Por lo tanto podrá esperarse que adsorberá el 20% de su peso en agua pudiendo ser regenerado.

El contenido residual de agua que permanece después de la regeneración es de un 5%. Entonces la capacidad de remoción de humedad será del 15% de su peso.

El peso de alúmina activada requerida será:

$$\frac{36.34}{0.15} = 242.23 \text{ lb}$$

Habiendo obtenido la cantidad de material de adsorción se pueden obtener las dimensiones de las torres que contendrán dicho material.

El diámetro y la altura de las torres de secado deben ser como mínimo los resultados del cálculo siguiente:

Cantidad requerida de desecante: 242.23 lb

$$W = 242.23 \text{ lb}$$

$$\rho = 50. \text{ lb} / \text{ft}^3$$

$$\therefore \text{Valumina} = 4.84 \text{ ft}^3$$

Considerando que el desecante ocupa el 50% del volumen de parte recta del recipiente;

$$V_{total} = (4.84)(2) = 9.69 \text{ ft}^3$$

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$\frac{L}{D} = 2 \therefore L = 2D$$

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 (2d) \therefore V = \frac{\pi}{2} D^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{2(9.62)}{3.1416}}$$

$$D = 1.829 \text{ ft}$$

$$L = 2D = 2(1.829)$$

$$L = 3.66 \text{ ft}$$

Diámetro ( $D$ ) de 1.820 ft y altura ( $L$ ) de 3.66 ft, son las dimensiones de las torres (cilindros) que alojarán el material desecante, y que es el equipo principal para el secado de aire.

---

## **5 Equipo Auxiliar del Paquete de Secado de Aire de Instrumentos**

El paquete de secado de aire se integra por diferentes componentes: compresores y secadores como componentes principales y equipo auxiliar como son filtros, intercambiadores de calor, trampas, tanque de almacenamiento.

La selección adecuada de los equipos auxiliares, tanto en el compresor como en el secador, garantizan una mejor operación, funcionamiento y seguridad, para el manejo del aire comprimido con una mejor calidad, siendo los de mayor importancia los que se mencionan en el desarrollo de este capítulo.

### **5.1 COMPONENTES AUXILIARES DEL COMPRESOR**

La función básica de estos componentes es la de mejorar la operación y el funcionamiento del compresor y no deben ser instalados en todos los tipos de compresores.

#### **5.1.1 Filtro de succión**

El aire atmosférico es en suma, vapor de agua y varios gases siempre contaminados por partículas sólidas. Estas se clasifican por su tamaño y concentración, factores que están íntimamente correlacionados.

La cantidad y naturaleza de los contaminantes del aire cambian con el lugar y la estación del año.

Para asegurar el funcionamiento confiable de un compresor es condición indispensable dotarle de un filtro de aire eficaz. Los contaminantes

abrasivos, que de otra forma llevaría el aire en suspensión anularían la lubricación de aceite y causarían excesivos desgastes internos.

Un buen filtro de aire debe reunir los siguientes requisitos:

- Elevada eficiencia de separación
- Buena capacidad de acumulación, para limpieza a intervalos espaciados
- Baja resistencia al aire
- Resistencia mecánica para soportar las pulsaciones de la tubería de aspiración, un fenómeno bastante frecuente en los compresores alternativos.

Los tipos de filtros de aspiración son los de papel y los de tipo laberinto.

Por lo tanto el tipo que utilizaremos es el filtro del tipo seco con una capacidad de retención de  $5 \mu$  y una eficiencia del 97% NBS.

### **5.1.2 Interenfriador**

Este es uno de los componentes indispensables en los compresores de dos o más pasos, para remover el calor generado por la compresión en el cilindro de baja compresión, y dejar llegar el aire al segundo cilindro (o a los subsecuentes), a una temperatura adecuada.

El agua que se suministra al Interenfriador (y al postenfriador), debe estar a la temperatura más baja posible, con el objeto de lograr una buena eficiencia del compresor y condensar la mayor cantidad de agua posible. La diferencia de temperatura del agua, entre la entrada y la salida del interenfriador, no debe exceder de  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mientras menor sea la diferencia, mayor será la eficiencia del compresor.

La temperatura del agua de salida del interenfriador, se calcula normalmente para una elevación de temperatura de 30 a  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 5.1.3 Postenfriador (Enfriador de descarga)

Es básicamente un intercambiador de calor. Los interenfriadores son la inversión más efectiva para reducir las altas temperaturas que salen del compresor.

**Las principales funciones de un postenfriador son:**

1. Disipa el calor desarrollado durante la compresión que eleva la temperatura, para manejarlo a niveles aceptables, principalmente por razones de seguridad.
2. Remueve el vapor de agua. Siempre se recomienda instalarlos antes de un paquete de secado ya que, hay una diferencia muy notable en la cantidad de humedad absoluta que satura el aire a la temperatura antes y después del postenfriador (del doble o mayor). De no usarse el postenfriador, el secador debería diseñarse, para mayor capacidad, lo que resultaría antieconómico.

La temperatura del aire comprimido al salir del compresor está entre 250 °F y 350 °F (121 °C - 177 °C). Los postenfriadores utilizan agua o aire como medio de enfriamiento para reducir la temperatura del aire y condensar arriba del 70% del vapor de agua.

Después de un postenfriador de agua, la temperatura del aire puede estimarse en 100 °F. A 100 °F y 100 PSIG, la humedad de saturación  $H_s$  es igual a 0.0038  $\frac{\text{lb de humedad}}{\text{lb de aire}}$ .

De acuerdo a lo anterior, el aire comprimido a 131 °F, tendrá una humedad de saturación 3.9 veces mayor que la que tendría a 100 °F. Por lo tanto, para secarlo, requerirá de un secador con 3.9 veces más la capacidad, lo que es más costoso que instalar un postenfriador.

El postenfriador debe instalarse tan cerca como sea posible de la descarga del compresor. De preferencia dentro del edificio de compresores. El postenfriador debe tener una caída de presión del orden del 2.8 PSI o 0.2 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura del agua a la salida es entre 10°C y 15 °C que la de entrada.

#### **5.1.3.1 Postenfriadores enfriados por aire.**

Utilizan un ventilador para circular el aire ambiental sobre un banco de tubos aletados o radiador que contiene el aire comprimido caliente.

Estas unidades son típicamente menos caras de operar que las unidades enfriadas por agua porque utilizan aire ambiental, que es gratis.

#### **5.1.3.2 Postenfriadores enfriados Por Agua.**

Diseño de tubo dentro de coraza, de una sola pasada y con flujos en sentido contrario, la circulación del aire será a través de los tubos y el agua de enfriamiento en la chaqueta.

El gradiente de temperatura entre la entrada del agua y la salida de aire no será mayor de 10 °C.

El postenfriador puede ser suministrado como parte integral del compresor, debiendo estar instrumentado contra falla en el suministro de agua de enfriamiento y estar provista de una trampa automática para remoción continua del condensado dentro de los tubos.

El postenfriador utilizado para nuestro sistema de secado en la plataforma de perforación de PEMEX, es el tipo enfriado con.

#### **5.1.4 Separadores**

Los hay de dos tipos: de mampara o de expansión y tipo centrífugo o ciclónico. Estos últimos son de mayor eficiencia en cuanto a separación de condensados. Esta eficiencia de separación es variable, dependiendo de la velocidad; sin embargo a velocidades de aire menores a la de diseño, disminuye. Por otra parte aumenta considerablemente la caída de presión. En la práctica, la eficiencia de separación puede considerarse entre 70 y 95 % según el tamaño y las variaciones de velocidad.

Los separadores generalmente se suministran como parte integral de otros equipos, tales como filtros, secadores, enfriadores, etc.

Los separadores de tipo ciclónico operan por una acción centrífuga, es decir, el flujo de aire que los atraviesa adquiere un movimiento de giro,



con lo que las partículas de agua salen despedidas contra las paredes del colector, y consecuentemente separadas del caudal de aire.

La entrada del separador se encuentra dispuesta en forma tangencial con relación a la carcasa. La salida se encuentra centrada en la parte superior de la unidad. Los colectores están hechos de acero, limpiados mediante chorro de arena y pintados exteriormente. Interiormente van tratados con aceite para evitar la formación de herrumbre o corrosión.

### **5.1.5 Tanque de almacenamiento**

Es un recipiente, normalmente de gran tamaño, dimensionado para almacenar suficiente aire comprimido para surtir demandas súbitamente que puedan presentarse en el sistema y para amortiguar las pulsaciones del aire

Sus dimensiones son de adaptarse a la capacidad del compresor, sistema de regulación presión de trabajo y variaciones de consumo de aire.

Estos sirven para:

1. Almacenar aire comprimido para cuando la demanda exceda la capacidad del compresor, así como absorber las pulsaciones propias de la compresión, haciendo uniforme el paro del aire comprimido a la siguiente fase del sistema de secado.
2. Incrementar la refrigeración y captar posibles condensados residuales y gotitas de aceite.
3. Compensar las variaciones de presión que tengan lugar en la red de tuberías.
4. Evitar ciclos de carga-descarga, del compresor, demasiado frecuentes.

Siempre que se instale un secador es necesario que exista un tanque, de otra manera las pulsaciones del aire tenderán a reducir la vida del desecante debido a la fricción producida, o a disminuir la eficacia de un refrigerativo.

La American Society of Mechanical Engineers (ASME) ha determinado normas para los tamaños adecuados de recipientes para aire comprimido.

Los recipientes cuya presión de trabajo sea de 125 *PSI*, debe tener capacidad para soportar en condiciones de seguridad, 160 *PSI* como mínimo.

Hay una fórmula teórica aceptable para calcular el volumen y el tamaño del recipiente, o de los recipientes necesarios para almacenar un volumen de aire dado.

$$V = \frac{T * C * Pa}{P_1 - P_2}$$

en el cual:

$V$  = Volumen del recipiente,  $m^3$  ( $ft^3$ )

$T$  = Tiempo en minutos, que debe durar surtiendo aire el recipiente para bajar de  $P_1$  a  $P_2$ .

$C$  = Cantidad de aire que debe surtir el recipiente, en pies cúbicos por minuto ( $ft^3/min$ ). Este valor se determina por estudios de carga del sistema.

$Pa$  = Presión atmosférica en  $kg/cm^2$  ( $lb/in^2$ )

$P_2$  = Presión mínima absoluta en el recipiente (presión mínima a la que trabaja el equipo en forma económica), en  $kg/cm^2$  ( $lb/in^2$ ).

#### 5.1.5.1 Cálculo del recipiente.

Despejando  $V$ :

$$V = \frac{TCPa}{P_1 - P_2}$$

$$V = \frac{(3 \text{ min}) \left( 413.095 \frac{ft^3}{min} \right) (14.27 \text{ lb/in}^2)}{119.497 \text{ lb/in}^2 - 79.669 \text{ lb/in}^2}$$

$$V = 443.968 \text{ ft}^3 \left( \frac{1 \text{ m}^3}{35.32 \text{ ft}^3} \right)$$

$$V = 12.57 \text{ m}^3$$

### **5.1.5.2 Instalación del recipiente**

Los recipientes deben instalarse siempre en serie a la tubería, haciendo que el aire “pase” a través de ellos. En esta forma, el aire pasa constantemente depositándose el agua y el aceite arrastrados por el aire comprimido. Deben instalarse además a la intemperie, pero en lugares sombreados y frescos, aunque también pueden instalarse dentro de un edificio o en el interior de una mina, situándolos de preferencia en un lugar bien ventilado y accesible, para el que el encargado los purgue con la frecuencia necesaria.

El recipiente de almacenamiento debe contar con una válvula de seguridad ajustada a 115 % de la máxima presión de trabajo para el recipiente.

En general se recomienda que el recipiente sea vertical, con el objeto de tener una etapa extra de separación para remoción de óxido, materias extrañas y humedad condensada que haya arrastrado el aire hasta ese lugar.

La Tabla 4.1 muestra las características generales del tanque receptor de aire comprimido.

Características generales
---------------------------

Capacidad	12.57m <sup>3</sup>
Tipo	Vertical
Diámetro	1.676 m
Altura total	7.25 m
Diseño	<b>ASME, Sección VIII, División I</b>
Material de Construcción	Según código ASME
<b>Conexiones</b>	
Entrada y salida de aire	12 F°
Registro de Inspección	11'' x 15''
Drenaje	1 - 1 <sup>1</sup> / 4 in NPT
Venteo	2.0 in NPT
Auxiliares (Medidor de presión)	2.0 in NPT
<b>Instrumentación en el tanque</b>	
* Un manómetro con válvula de bloqueo y desfogue	
* Un termómetro con termopozo de acero inoxidable	
* Una válvula automática para el drenado de condensados	
* Una válvula de alivio	

Tabla 4.1 Tanque receptor de aire

### **5.1.6 Accionamiento del compresor**

Los compresores recíprocos para aire de instrumentos son prácticamente accionados por un motor eléctrico.

La transmisión de la potencia del motor al compresor, se logra comúnmente mediante bandas de sección transversal en forma de “V”, ó bandas “V”, y poleas en el motor y en el compresor.

Este tipo de transmisión permite seleccionar, casi sin restricciones, el tipo y la velocidad del motor de accionamiento, facilita el alineamiento del motor con el compresor, pero tiene eficiencia de transmisión de 96% aproximadamente, lo que significa que representa una pérdida del 4% de la potencia del motor.

La ventaja más importante de este tipo de transmisión es que se puede cambiar el motor en caso de falla, en cuestión de minutos o de días en caso de tener que comprarse por tratarse de motores de fabricación estándar; lo cual no ocurre con los motores de acoplamiento directo al compresor por ser de fabricación especial y ser muy costosos para poder tener un repuesto.

#### **5.1.6.1 Tipos de motores**

Son tres los tipos que se aplican al accionamiento de compresores: motores de inducción del tipo jaula de ardilla, motores de inducción de anillos deslizantes o de rotor devanado y motores síncronos.

El motor de inducción del tipo jaula de ardilla es el más popular por ser de construcción sencilla y por tanto, relativamente económico. Tiene la desventaja de que la corriente que toma para el arranque, puede ser de 5 a 7 veces mayor que su corriente de plena carga.

El motor de inducción de anillos deslizantes es de rotor devanado y permite limitar la corriente de arranque, y a la vez lograr un alto par de arranque, regulando la corriente que se alimenta al rotor. Este motor arranca, por tanto, a baja velocidad y va aumentando de velocidad paulatinamente, hasta alcanzar su velocidad sincrónica, en cuyo momento trabaja igual que el motor de jaula de ardilla.

El motor síncrono se aplica generalmente en tamaños de 400 caballos o mayores y se usa específicamente para corregir el factor de potencia del sistema eléctrico de la planta. Este motor es el más costoso de todos y está en general, fuera del intervalo de aplicación para compresores que se fabrican en México, por ahora. Por lo anterior, no nos ocuparemos más de éste tipo de motor.

Los motores de inducción se fabrican con diversos tipos de carcasa, dependiendo la protección que requieren el uso que se les va a dar y así se tienen motores a prueba de goteo, motores a prueba de polvo o totalmente cerrados y con ventilación mecánica y motores a prueba de explosión.

Este último es el que utilizaremos para nuestra plataforma de perforación E-KU-A2 ya que éstos motores son totalmente cerrados, para impedir que una chispa que se origine en el interior del motor, pueda encender gases explosivos que estén presentes en el aire ambiente, como los que se encuentran en las refinerías de petróleo.

### **5.1.7 Tablero de control para el compresor**

Para el control de operación del compresor se incluye un tablero con enclaustramiento NEMA 7 adecuado para el área Clase 1, Grupo B, División 1.

Este tablero debe estar especialmente diseñado para monitorear, proteger y regular compresores reciprocantes de uso pesado. Así como capacidad de emitir una alarma o paro de acuerdo con lo siguiente:

#### **5.1.7.1 Señales de alarma**

El tablero emite una señal de alarma luminosa amarilla cuando cualquiera de las siguientes situaciones anormales existe:

- Baja presión de aceite de lubricación
- Alta temperatura de aceite de lubricación

- Alta temperatura de descarga de la primera etapa del compresor (antes del interenfriador)
- Alta temperatura de descarga de la segunda etapa del compresor (antes del postenfriador)
- Alta temperatura de los suministros de agua de enfriamiento a las chaquetas de los cilindros
- Alto nivel de los condensados en los separadores de humedad (señal común para los separadores del interenfriador y postenfriador).

#### **5.1.7.2 Señales de paro**

El tablero emite una señal luminosa roja y el compresor se parará cuando cualquiera de las siguientes situaciones anormales exista:

- Muy baja presión de aceite de lubricación
- Alta vibración

#### **5.1.8 Instrumentos registradores**

En las instalaciones automáticas que funcionan sin operador, es conveniente instalar registradores o aparatos gráficos de presiones y temperaturas, para poder analizar en cada caso de falla, las causas que lo originaron.

#### **5.1.9 Termómetros y manómetros indicadores**

En cada recipiente se requiere un manómetro y un termómetro. El manómetro indica la presión interna del recipiente, y el termómetro la temperatura del aire que contiene, la cual sirve de indicación del porcentaje de capacidad del recipiente que se está aprovechando.

A mayor temperatura del aire corresponde una menor masa de aire que puede almacenarse en el recipiente a una presión dada.

Cuando la temperatura del recipiente baja a 0°C ó a una temperatura menor, el operador, al observar esto toma las providencias necesarias para evitar la congelación de su purga.

El proveer de un termómetro en la descarga del compresor puede ayudar a detectar un problema de fuga en alguna de las válvulas del compresor. Al haber fuga en una válvula, puede originarse una recompresión, la cual hace subir la temperatura de descarga del compresor, en forma anormal, hasta valores de 175 a 200 °C.

#### **5.1.10 Requerimientos de instrumentación en el compresor.**

**Termómetros** Cuatro termómetros cada uno instalado con su respectivo termopozo de acero inoxidable para los siguientes servicios

- Para aire a la descarga de la primera etapa del compresor.
- Para aire a la descarga de la segunda etapa del compresor.
- Para el aceite de lubricación.
- Para el agua de enfriamiento a la entrada del compresor

**Manómetro** Cuatro manómetros cada uno instalado con su válvula de bloqueo y desfogue para los siguientes servicios

- Para aire a la descarga de la primera etapa del compresor.
- Para el aire a la descarga de la segunda etapa del compresor.
- Para el aceite de lubricación.
- Para el agua de enfriamiento a la entrada al compresor



## 5.2 COMPONENTES AUXILIARES DEL SECADOR

El sistema de purificación combina filtración y separación de humedad y vapores de aceites hasta alcanzar los niveles de calidad de aire requerido.

### 5.2.1 El Prefiltro

Su función es separar además de las partículas sólidas, aerosoles cuyo rango de tamaño va de 0.01 *micras* hasta gotas de 1 *micra* de diámetro y mayores.

De la eficiencia con que separe estos contaminantes dependerá el buen funcionamiento del secador y la vida útil del material deshidratador que contenga.

La selección de una filtración adecuada depende del grado de:

- Requerimiento de filtración
- Caída de presión
- Vida útil esperada del filtro
- Flujo
- Presión requerida
- No se seleccionan los filtros por el tamaño de la conexión.

#### 5.2.1.1 Tipos disponibles de filtración

Cartucho de profundidad de flujo radial. Es un filtro de profundidad constituido por un cilindro de flujo hacia afuera (flujo inverso). Puede ser de fibras de poliéster o de lana de vidrio. Su principal mecanismo de separación es el impacto inercial y la intercepción difusional que permite la coalescencia.

Separador mecánico. (Trampa): Emplea la fuerza centrífuga y el impacto inercial. Su eficiencia depende de la velocidad.

Columna empacada. El recipiente empacado con gránulos de material termoplástico o de material absorbente. Actúa por impacto inercial (adsorción).

Cartucho empacado de flujo axial. Contienen dos lechos empacados y flujo hacia abajo.

Cartucho plisado de flujo inverso radial. El medio filtrante es delgado, de fibras muy finas (tamaño de poro muy pequeño) en varias capas, siendo la intermedia una fibra de vidrio o fibra de poliéster.

### 5.2.2 Filtros coalescentes

Coalescencia. Los aerosoles líquidos fluyen a través del filtro de profundidad y se colectan en las fibras de vidrio. Las gotas viajan a lo largo de las fibras hasta el punto donde son detenidos. Las gotas se aglutinan hasta que tienen suficiente volumen para bajar por gravedad al fondo del cartucho del filtro.

Los filtros coalescentes:

- remueven aerosoles tan pequeños como  $0.01 (\mu) \text{ micras}$
- eficientes aún en flujos reducidos
- de fibras de vidrio mantienen sus propiedades originales

### 5.2.3 El postfiltro

Después de pasar por un pre filtro y por un secador, el aire comprimido se encuentra libre de agua y de aceite, tanto líquidos como vapores; sin embargo, puede haber partículas, como incrustaciones de la tubería o polvos finos del desecante.

Los polvos finos del desecante son partículas de tamaño menor a  $5 \mu$  y por ser abrasivos, pueden erosionar instrumentos, asientos de válvulas, cilindros herramientas neumáticas, etc.

Para separar ésta contaminación se necesita un filtro. Ya que la mayoría de estas partículas están en el rango de 1 a 5  $\mu$ , debe usarse un medio filtrante cuya retención absoluta sea una micra como mínimo.

Al pasar el aire sucio por el postfiltro y separarse la contaminación sólida en éste último, se obtendrá aire comprimido seco y limpio, con una calidad suficiente para cumplir con las necesidades de la mayoría de las aplicaciones de aire comprimido.

Generalmente la mayoría de proveedores se inclinan por la utilización de pre filtros coalescentes y/o separadores mecánicos o la combinación de ellos.

Comúnmente al pedir cotización de un paquete de secado a cualquier proveedor, nos lo muestra como tal, un paquete que contienen un prefiltro, un secador y un postfiltro, con sus accesorios como los manómetros y drenes de condensados.

Por lo tanto, cada fabricante o proveedor tiene su propio diseño del paquete.

### **5.3 EQUIPOS DE PROTECCIÓN Y CONTROL**

Todo sistema de aire comprimido necesita ciertos elementos auxiliares para el control de su operación y para su protección contra las fallas a que está sujeto el equipo.

#### **5.3.1 Válvulas de seguridad o de Alivio**

Se requieren en el recipiente, interenfriador y tanques del secador. Proveen de protección para tales elementos contra sobrepresiones, deben ser de la capacidad correcta para el volumen de aire que dejan escapar a la atmósfera. Equivalen al tapón de seguridad de la “olla exprés” el cual salta antes de que la olla haga explosión. Estas válvulas deben ajustarse para abrir a una presión 10 % mayor que la presión de trabajo del compresor, y es indispensable que se prueben regularmente para verificar que operen libremente. También debe instalarse una de éstas válvulas

entre el compresor y la válvula de cierre que se encuentra en la tubería que va al recipiente.

### **5.3.2 Protección por falla de presión del aceite.**

Consiste en un manómetro que acciona un contacto eléctrico que actúa para abrir el circuito de alimentación del motor, o modificar el accionamiento del gobernador de velocidad, en el caso de que la presión del aceite baje más allá de un valor predeterminado.

### **5.3.3 Dispositivos termostáticos.**

Sirven para tomar acción cuando se presentan temperaturas más altas o más bajas de las normales. Al accionar un contacto eléctrico, pueden cerrar una válvula de combustible, accionar un gobernador o parar un motor eléctrico.

### **5.3.4 Alcance de suministro del paquete de secado**

El paquete de secado debe suministrarse montado en una base con la siguiente instrumentación y características especiales

- Postfiltro tipo partículas con indicador de presión diferencial
- Tubería de “by pass” con válvulas para el prefiltro y postfiltro.
- Tubería de “by pass” con válvulas para el prefiltro y postfiltro.
- Tubería de “by pass” con válvulas para el paquete de secado.
- Válvulas de alivio instaladas en cada torre de secado.
- Indicadores de presión instalados en cada torre de la secadora con su válvula de bloqueo y desfogue.
- Manómetros a la entrada y salida del paquete de secado con su válvula de bloqueo y desfogue
- Conexiones bridadas a la entrada y salida del paquete de secado.
- Válvulas de regulación de aire de purga.

- Medidor de flujo de aire de purga.
- Indicador de humedad instalado a la salida de la secadora.
- Interruptor de arranque y paro con luz indicadora de encendido.
- Alarma por falla del cambio de ciclo con terminales para señalización remota.
- Alarma por alta humedad con terminales para señalización remota.
- Controles adecuados para 110 V / 1 fase / 60 Hertz.
- Todos los dispositivos eléctricos dentro de enclaustramientos adecuados.
- Para instalación en clasificación de área grupo B clase 1 división 1

## **CONCLUSIONES**

Todo sistema de instrumentos del tipo neumático requiere de aire seco y limpio. El cual debe ser suministrado por un sistema formado por un compresor y un paquete de secado que incluyan todos sus equipos auxiliares.

Para el buen funcionamiento y diseño de este sistema se tomaron en cuenta todos los datos psicométricos del sitio donde será instalado.

El compresor propuesto para el sistema es del tipo reciprocante de "cilindro no lubricado", del cual su mayor ventaja, es entregar el aire comprimido libre de aceite.

Con el análisis de los diferentes métodos de secado de aire tomando en cuenta las ventajas y desventajas que ofrece cada uno de ellos, y la eficiencia para separar la humedad, la mejor opción es utilizar un secador regenerativo tipo "heatless".

Con la información generada en el cálculo y selección del compresor y secador, es responsabilidad del fabricante el diseño y selección del equipo auxiliar

La evaluación técnica desarrollada en el presente trabajo, permite tener una metodología para seleccionar el paquete de secado de aire de instrumentos de manera confiable, ya que involucra los requerimientos mínimos que garantizan aire limpio y seco. Esta metodología no es limitativa para aire de instrumentos.

De igual forma, el ingeniero especialista debe utilizar su conocimiento y criterio para seleccionar el equipo más adecuado, evaluando técnica y económicamente diferentes opciones de fabricantes.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- E. Carnicer Royo. "Aire comprimido. Teoría y cálculo de las instalaciones". Editorial Guatavo Gili, S.A. España 1977.
- Robert H. Perry. "Manual del Ingeniero Químico". Editorial McGraw Hill. 6ª Edición. Tomo 6. México 1994.
- Anelly-Valdemoro. "Atlas Copco. Manual". B. 4 a Edición. España 1988.
- Guillermo Cortés Populus. "Curso de secado y purificación de gases comprimidos". PUROMEX. México 1994.
- Ingeniería de instalaciones de aire comprimido. JOY. Máquinas de Proceso S.A. México 1990.
- Entendiendo el tratamiento del aire comprimido. Manual. Hankinson Internacional. 1992.
- Secadores regenerativos de aire comprimido. Manual de instrucciones. Hankinson Internacional. 1995.
- Royce N. Brown. "Compressors selection and sizing". Editorial Guif Publishing Co. U.S.A. 1986.
- Charles w. Gibbs. "Compressed air and gas data". Ingersoll-Rand Company. 2ª Edición. U.S.A. 1971.
- Greene Richard W. "Compresores, selección, uso y mantenimiento". Editorial McGraw Hill 1 Interamericano de México. México 1989.
- Frank L. Siejko. "Adsorption technology". Editorial Marcel Dekker inc. U.S.A. 1985.
- Williams-Garder. "Industrial Dryng". Editorial George Godwin LTD. U.K. 1976.
- Aruns. Mujumdar. "Advances in drying". Editorial Hemisphere Publishing Corporation. U.S.A. 1980.
- Jhon P. Rollins. "Compressed air and gas Handbook". 4ª Edición-
- Huang, Francis F. "Ingeniería termodinámica". Editorial Cía. Editorial Continental, S.A. 4 a Edición. México.
- Hidrocarbón Processing. Revista Mensual. Julio 1994. Vol. 3 No. 7. Alien Parkway. Houston Texas, U.S.A.



Moring Faires, Virgil. "Termodinámica". 1 Max Simmang Clifford. Editorial U.T.H.E.A. México 6 a Edición.

Reciprocating Compressors for General Refinery Services. American Petroleum Institute (API 618) 3ª Edición. U.S.A. 1986.

Diccionario de ingles para Ingenieros. Robb Luis A. Editorial C.E.C.S.A. 1ª Edición. México 1991.

Wark, Kenneth. "Termodinámica". Editorial Interamericano. 1ª a Edición en Español (4ª Edición). México 1984.

Packaged Reciprocating Plant and Instrument Air Compressors For General Refinery Services (API 680).

## **ANEXO A. Definición de conceptos y términos**

Los siguientes conceptos y términos ayudarán a comprender mejor una planta de compresión y secado de aire.

**ACFM** .- Pies Cúbicos por Minuto Reales. Es el flujo real de aire o gas suministrado en la conexión de descarga de un compresor, expresado en pies cúbicos por minuto bajo las condiciones de temperatura y presión existentes a la entrada del compresor. El flujo en ACFM para un determinado compresor funcionando a una velocidad dada permanece constante, independientemente de la temperatura, presión atmosférica o altitud del lugar de operación del compresor.

**ADSORBENTE**.- También llamado desecante, es una materia muy resistente físicamente y es químicamente inerte, extremadamente poroso, que permite la adsorción de un gran volumen de agua en una cantidad de desecante relativamente pequeña.

**AIRE ATMOSFÉRICO**.- Generalmente aceptado como mezcla de gases que se encuentran en la capa exterior de la tierra. El aire atmosférico contiene cierta porción de humedad. La aptitud del aire para retener agua vaporizada está relacionada con la temperatura y la presión, pero principalmente con la primera, admitiendo mas vapor de agua cuando aumenta su temperatura.

**AIRE ESTÁNDAR**.-Aire a condiciones estándar especificadas de temperatura, presión y humedad.

**AIRE LIBRE**.-Aire a condiciones atmosféricas en cualquier lugar específico. Dado que la altitud, presión barométrica, temperatura y humedad relativa pueden variar en diferentes lugares, de ello se desprende que un pie cúbico de aire libre será siempre un pie cúbico, pero su temperatura, densidad (peso) y composición pueden variar.

**AIRE NORMAL, A CONDICIONES NORMALES**.-Término usado antiguamente para describir el Aire Estándar y las Condiciones Estándar, véase este último.

**AIRE COMPRIMIDO**.- Es un "medio" conveniente para transmitir energía capaz de ejecutar trabajo a lugares remotos, para accionamiento de máquinas, herramientas, instrumentos y para infinidad de usos comunes. En los sistemas de aire comprimido, el aire aspirado por el compresor entra a la presión y temperatura ambientes con su respectiva humedad relativa.

**BOYLE-MARIOTTE**.- Edme Mariotte, físico francés, descubrió independientemente este mismo principio, casi al mismo tiempo que Boyle. Aunque a Mariotte se le debe igual crédito, la ley suele llamarse únicamente "ley de Boyle".

**CALOR**.- El calor se define como energía que atraviesa las fronteras de un sistema, debido a una diferencia de temperaturas entre dichos sistemas y sus alrededores. El calor que fluye hacia el sistema es positivo, en cambio el que emana de el se considera negativo.

**CALOR ESPECÍFICO**.- Es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de una sustancia a un grado de temperatura.

**CAPACIDAD.**-La capacidad de un compresor es el flujo de gas comprimido y suministrado a la velocidad máxima especificada, en las condiciones de temperatura, presión y composición del gas (incluyendo la humedad relativa) existentes a la entrada del compresor. La capacidad puede ser real o nominal.

**CAPACIDAD ACTUAL (REAL).**- Cantidad de gas comprimido y liberado en el sistema de descarga a velocidad nominal de la máquina a las condiciones de succión del gas de la primera etapa del compresor.

**CAPACIDAD NOMINAL.**- Es la cantidad de gas sobre la cual el fabricante del compresor se basa para realizar el diseño de la máquina a proporcionar.

**CFM** .-Pies Cúbicos por Minuto.

**CICLO DE UN SECADOR.**- Se define como el tiempo de adsorción más el tiempo de regeneración.

**CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN.**- también llamada **de Köppen-Geiger**.. Consiste en una clasificación climática mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima.

**CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA A.**- Se caracteriza porque todos los meses tienen una temperatura media superior a los 18 °C y las precipitaciones anuales son superiores a la evaporación.

**m:** precipitaciones constantes excepto algún mes seco y precipitaciones exageradas algunos meses.

**Am – Monzónico.** Con algún mes por debajo de 60 mm y si la precipitación del mes más seco es superior a la fórmula  $[100 - (\text{Precipitación anual}/25)]$ .

**COMPRESIBILIDAD.**- Es la desviación que experimenta un gas real, con respecto a un gas ideal y viene indicado por el factor de *compresibilidad*  $z$ . Las ecuaciones exactas de estado son inconvenientes para los cálculos por que las expresiones son inmanejables. Todas estas ecuaciones son usadas para la preparación de tablas y diagramas de propiedades. En algunos casos las desviaciones de  $z$  son considerables, por lo que es necesario se tomen en cuenta en los cálculos para evitar errores en la selección de los equipos. El valor de  $z$  depende del gas y está en función de la presión y la temperatura.

**COMPRESOR.**- Es un dispositivo mecánico para manejar gases, capaz de transferir energía eficientemente al medio gaseoso y así poder ser entregada a condiciones de presiones elevadas y volúmenes menores.

**COMPRESOR AXIAL.**- En éste tipo de compresor los álabes, consisten en paletas aerodinámicas, situadas de manera que al girar, el gas se mueve hacia el borde saliente de los álabes. En el espacio que queda entre los álabes se produce un efecto de difusión y desaceleración a medida que el gas se mueve hacia el borde siguiente de paletas móviles.

En éstos compresores, el flujo del gas es paralelo al rotor del compresor y no cambia de sentido como en los centrífugos.

**COMPRESOR CENTRÍFUGO O RADIAL.-** Este tipo de compresor transforma la energía mecánica en energía cinética transmitida por el impulsor al fluido del trabajo. Consiste principalmente en un impulsor rotatorio y en uno o más pasos divergentes, a través de los cuales se descarga el gas. La presión se produce al aumentar la velocidad del gas que pasa por el impulsor. Al salir despedido del impulsor el gas se mueve a una velocidad elevada y, por lo tanto, posee energía cinética, la mayor parte de la cual se puede convertir en presión si se disminuye correctamente el gas. El objetivo del difusor, es convertir la energía cinética en presión.

**COMPRESOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.-** Comprenden todas las máquinas que funcionan absorbiendo una cantidad de gas en un espacio cerrado, dentro del cual se reduce su volumen aumentando su presión.

**COMPRESORES DINÁMICOS.-** Son máquinas de flujo continuo, cuyo principio de funcionamiento es la ecuación de Euler. Sus velocidades de trabajo son elevadas, por lo cual suministran una alta energía cinética al gas cuando el fluido pasa a través de la máquina. Esta energía se convierte parcialmente en presión en el elemento rotatorio y en los álabes estacionarios o difusores posteriores.

**COMPRESOR DE DOS ETAPAS.-** Son máquinas en las cuales el gas comprimido de una presión inicial a una presión intermedia en uno o más cilindros en una etapa, y a una presión final de descarga en uno o más cilindros, en el segundo paso.

**COMPRESOR RECIPROCANTE.-** Son máquinas en las cuales el elemento de compresión es un pistón con movimiento recíprocante dentro de un cilindro.

**CONDENSACIÓN.-** Es el cambio de vapor de agua a agua líquida.

**DESPLAZAMIENTO.-** Volumen barrido por el elemento compresor (pistón, rotor de tornillo, etc.) por unidad de tiempo; generalmente se expresa en pies cúbicos por minuto.

**DESPLAZAMIENTO POSITIVO.-** Esto describe al tipo de compresores recíprocantes, de lóbulos giratorios y de tornillo.

**EFICIENCIA DE COMPRESIÓN.-** Es la relación calculada del trabajo isoentrópico dividido entre el trabajo termodinámico dentro del cilindro. Usualmente se indica como un porcentaje, la importancia de la eficiencia del compresor para todo proceso termodinámico es por las pérdidas por fricción en los fluidos dentro del cilindro del compresor.

**EFICIENCIA MECÁNICA.-** Es la relación del rendimiento del trabajo mecánico en el cilindro o carcasa, por carrera, por unidad de tiempo dividido por la potencia actual medida durante algunas carreras en algún tiempo. Se expresa como un porcentaje. La eficiencia mecánica es importante por todas las pérdidas mecánicas.

**EFICIENCIA VOLUMÉTRICA.-** Es la razón del volumen real del gas entre la capacidad del cilindro y el desplazamiento del pistón, expresada en un tanto por ciento.

**ENTALPÍA (CONTENIDO DE CALOR).-** Suma de las energías internas y externas de una sustancia.

**FILTRO.-** Son dispositivos para remover polvo y partículas de suciedad de los gases antes de la entrada del compresor.

**FLUJO VOLUMÉTRICO A LA SUCCIÓN.-** Se refiere al flujo nominal a las condiciones de presión, temperatura compresibilidad y mezcla existente a la succión del compresor (esto es lo mismo que la capacidad actual).

**FLUJO VOLUMÉTRICO ESTÁNDAR A LA SUCCIÓN.-** Se refiere a la capacidad del compresor a las condiciones estándar, y son: 1.014 Bar absolutos y 15.6 °C.

**GAS AMARGO.-** Gas natural que contiene cantidades significativas de ácido sulfhídrico.

**HUMEDAD.-** El aire atmosférico siempre contiene humedad, o vapor de agua. La cantidad de humedad retenida en el aire se determina por la temperatura y, en menor magnitud, por la presión.

Cualquier baja en la temperatura o incremento en la presión causará condensación de la humedad del aire.

**HUMEDAD, ESPECÍFICA.-** Peso del vapor de agua en una mezcla aire-vapor por unidad de peso del aire seco.

**HUMEDAD ABSOLUTA.-** Es el peso de vapor de agua, expresada en *kg*, existente en un kilogramo de aire seco. Se representa por la letra *W*. Es decir se tiene la relación

$$w = \frac{\text{kg.de.vapor.de.agua}}{\text{kg.de.aire.seco}}$$

**HUMEDAD RELATIVA (presión relativa del vapor).** - Es la relación entre la humedad absoluta existente, *w* y la humedad máxima que tal sistema podría contener, es decir, la humedad de saturación *Ws*. Se representa por *Wr* y se da en tanto por ciento:

$$Wr = \frac{w}{w_s} \times 100$$

Una humedad relativa del 100 % significa que se trata de un ambiente saturado, es decir, en el que  $W = W_s$ .

Una humedad relativa del 0% indica que se trata de un ambiente totalmente exento de humedad.

El tanto por ciento indicado para la humedad relativa nos permite conocer el grado de saturación.

**HUMEDAD DE SATURACIÓN.-** Es el máximo peso de vapor de agua que admite un kilogramo de aire seco a una determinada temperatura y presión.

La humedad de saturación representada por  $W_s$ , sólo dependerá de la presión y la temperatura. Si en un ambiente de aire saturado se añade más agua líquida, la humedad de saturación permanecerá constante y la totalidad del agua añadida se mantendrá en su estado líquido sin evaporarse.

**INTERENFRIADOR.-** Son cambiadores de calor localizados entre las etapas, utilizados para remover el calor de compresión y remover humedad.

**MICRA.-** 1 micra =  $1 \times 10^{-6}$  metros = 0.000001 metros

**MMSCFD.-** Million standard cubic feet per day (MM = 1000 x 1000)(Millón de Pies cúbicos Estándar por Día).

**MULTIETAPA.-** Un compresor no es eficiente si se quiere comprimir aire desde una presión atmosférica en una sola etapa. Lo mejor será comprimir en dos o más etapas de compresión, enfriando el aire entre cada etapa.

**PEMEX.-** PETRÓLEOS MEXICANOS. Organismo paraestatal encargado de la extracción y procesado de petróleo y gas.

**POSTENFRIADOR.-** Son cambiadores de calor para enfriar el gas de la descarga final del compresor. Provee los medios efectivos para remover humedad del gas comprimido.

**POTENCIA NOMINAL.-** Es la potencia máxima del compresor añadiendo algunos aditamentos en el eje del accionador requeridos para algunas condiciones de operación especificadas. La potencia nominal incluye los efectos de algunos equipos (como los dispositivos de supresión de pulsaciones, tuberías, interenfriadores, postenfriadores y separadores), suministrados por el vendedor del compresor. Las pérdidas del accionador son consideradas por separado.

**POTENCIA, TEÓRICA (POLITRÓPICA)** Potencia requerida para comprimir politrópicamente el gas o aire entregado por un compresor a la presión nominal.

**PRESIÓN.-** Es la unidad de fuerza sobre la unidad de área.

**PRESIÓN ABSOLUTA.-** Es la presión manométrica más la presión atmosférica a condiciones promedio sobre el nivel del mar. En términos prácticos, es la suma de las presiones manométrica y atmosférica.

**PRESIÓN ATMOSFÉRICA.-** Es la presión debida a la mezcla gaseosa que envuelve a la tierra. Varía en diferentes partes de la tierra, según la altura donde se localiza el lugar escogido para medirla.

**PRESIÓN DE DESCARGA.-** Es la presión absoluta del gas en la brida de descarga del compresor.

**PRESIÓN DE DESCARGA NOMINAL.-** Es la presión de descarga más alta requerida para reunir las condiciones especificadas por el comprador para el intento de servicio.

**PRESIÓN MANOMÉTRICA.-** Es la variación entre la presión real de un gas y la presión barométrica.

**PRESIÓN DE SUCCIÓN.-** Es la presión absoluta del gas en la brida de succión del compresor.

**PUNTO NORMAL DE OPERACIÓN.-** Es el punto en el cual la operación usual es supuesta y la eficiencia máxima es lograda. Este punto es usualmente el punto al cual el vendedor certifica el rendimiento del compresor.

**PUNTO DE ROCÍO.-** Es la temperatura en la cual el vapor de agua del aire se condensa.

Puntos de rocío muy bajos indican aire seco y, por lo tanto, de gran calidad; puntos de rocío elevados suponen aire con altas humedades relativas. De donde se deduce que, para aire con humedad relativa: - Inferior al 100% (aire seco), el punto de rocío será siempre inferior a la temperatura real del ambiente considerado. - Igual al 100% (aire saturado), el punto de rocío coincidirá con el de la temperatura real del ambiente considerado. - Igual al 100%, pero conteniendo fase líquida en suspensión (nieblas), el punto de rocío será superior al de la temperatura real del ambiente considerado. Habitualmente, el punto de rocío se determina utilizando tablas o diagramas psicrométricos. Así mismo, existen medidores de punto de rocío que proporcionan la lectura directa del mismo.

**RECEPTORES DE AIRE.-** Son tanques usados para el almacenaje del gas descargado del compresor. Ellos ayudan a eliminar presiones de pulsaciones en la línea de descarga.

**RELACIÓN DE COMPRESIÓN.-** Es la razón entre la presión de descarga absoluta y la presión de succión absoluta.

**SCFM.-** Standard Cubic Feet per Minute (Pies Cúbicos Estándar por Minuto)

**SECADORES.-** Es el equipo que mantendrá baja la presión de punto de rocío en un sistema de aire comprimido.

**SLUG CATCHER.-** Separador de Gas y Líquido.

**TEMPERATURA.-** Se define como una propiedad de estado, cuyo valor numérico establece cuando dos o más sistemas, en contacto térmico, se encuentran o no en equilibrio termodinámico. La temperatura es el grado de calor térmico de un cuerpo considerado con referencia a su poder de comunicar calor a otros cuerpos.

**TEMPERATURA DE DESCARGA.-** Es la temperatura absoluta del gas medida en la brida de descarga del compresor.

**TEMPERATURA DE SUCCIÓN.-** Es la temperatura absoluta del gas medida en la brida de succión del compresor.

**TEMPERATURA MÁXIMA PERMISIBLE.-** Es la temperatura máxima continua para la cual el fabricante tiene diseñado el equipo (o algunas partes en las cuales interviene calor),

**TEMPERATURA DE BULBO SECO.-** o temperatura seca es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.

**TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.-** El **termómetro de bulbo húmedo** es un termómetro de mercurio que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua. Al proporcionarle una corriente de aire, el agua se evapora más o menos rápidamente dependiendo de la humedad relativa del ambiente, enfriándose más cuanto menor sea ésta, debido al calor latente de evaporación del agua.

**VIENTOS ALISIOS.-** Son los que soplan de manera relativamente constante en verano y menos en invierno.

**KU MALOOB ZAAP (KMZ)** se localiza frente a las costas de Tabasco y Campeche, a 105 kilómetros al noreste de Ciudad del Carmen, Campeche. Su historia comenzó con el descubrimiento del campo Ku en 1980 por el Pozo Ha-1A que dio inicio a su producción en marzo de 1981. Posteriormente se descubrieron los campos Maloob en el año 1984 y Zaap en el año 1991.

**KU MALOOB ZAAP** se extiende en un área de 149.5 kilómetros cuadrados. En la actualidad este activo se conforma por los campos Ku, Maloob, Zaap, Bacab y Lum, los cuales toman su nombre en honor a la cultura maya que predominó en la zona de Campeche y Yucatán. En lengua maya su significado es el siguiente:

- **Ku** - Nido
- **Maloob** - Bueno
- **Zaap** - Braza
- **Bacab** - Columna
- **Lum** - Tierra

**KU MALOOB ZAAP** es uno de los principales productores de crudo pesado. Hasta el 2008, era el segundo complejo petrolero en importancia en el país en términos de reservas probadas de hidrocarburos y producción de crudo.



## ANEXO B. Nomenclatura

NOTACION	SIGNIFICADO	UNIDADES	
		Sist. Ingl.	S. I.
ACFM	Flujo volumétrico actual	ft <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /s
BHP	Potencia al freno	HP	kW
BHP <sub>A</sub>	Potencia del accionador	HP	kW
BHP <sub>T</sub>	Potencia al freno total	HP	kW
C	Calor específico	BTU/lb°R	kcal/kgk
C <sub>p</sub>	Calor específico a presión constante	BTU/lb°R	kcal/kgk
C <sub>v</sub>	Calor específico a volumen constante	BTU/lb°R	kcal/kgk
GHP	Potencia para comprimir el gas	HP	kW
K	Relación de calores específicos	Adimensional	
M	Masa	Lb	kg
η <sub>a</sub>	Eficiencia adiabática	%	
η <sub>M</sub>	Eficiencia mecánica	%	
η <sub>T</sub>	Eficiencia total	%	
η <sub>V</sub>	Eficiencia volumétrica	%	
P	Presión	Lb/in <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
P <sub>c</sub>	Presión crítica	Lb/in <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
P <sub>R</sub>	Presión reducida	Lb/in <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Q	Calor	BTU	kJ
r	Constante universal de los gases	Lbm/lbm°R	kgm/kgmK
R	Constante particular del gas	Lb/°R	m/K
R <sub>c</sub>	Relación de compresión	Adimensional	
T	Temperatura absoluta	°R	K
T <sub>R</sub>	Temperatura reducida	°R	K
V	Flujo volumétrico	ft <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /min

NOTACION	SIGNIFICADO	UNIDADES	
		Sist. Ingl.	S. I.
W	Trabajo	BTU	Joules
w	Flujo másico	Lb/min	kg/s
z	Factor de compresibilidad	Adimensional	

Nomenclatura (continuación)

## ANEXO C.- Tabla C1 Contenido de humedad en °F y °C

Punto de Rocio °F	Granos por pie cubico	Punto de Rocio °C	Punto de Rocio °F	Granos por pie cubico	Punto de Rocio °C
120	37	48.9	-5	0.30	-20.6
115	32	46.1	-10	0.23	-23.3
110	28	43.3	-15	0.18	-26.1
105	24	40.6	-20	0.13	-28.9
100	20.5	37.8	-25	0.10	-31.7
95	17	35.0	-30	0.075	-34.4
90	15	32.2	-35	0.055	-37.2
85	13	29.4	-40	0.040	-40.0
80	11	26.7	-45	0.029	-42.8
75	9.5	23.9	-50	0.021	-45.6
70	8.0	21.1	-55	0.015	-48.3
65	6.8	18.3	-60	0.010	-51.1
60	5.8	15.6	-65	0.0075	-53.9
55	4.8	12.8	-70	0.0053	-56.7
50	4.0	10.0	-75	0.0037	-59.4
45	3.3	7.2	-80	0.0026	-62.2
40	2.7	4.4	-85	0.0017	-65.0
35	2.2	1.7	-90	0.0011	-67.8
30	1.7	-1.1	-95	0.00080	-70.6
25	1.4	-3.9	-100	0.00050	-73.3
20	1.1	-6.7	-105	0.00032	-76.1
15	0.85	-9.4	-110	0.00021	-78.9
10	0.67	-12.2	-115	0.00014	-81.7
5	0.53	-15.0	-120	0.00009	-84.4
0	0.4	-17.8			

Fuente: Puromex, curso de secado y purificación de gases comprimidos.

### ANEXO D.- Tabla de comparaciones de características entre secadores de adsorción

Característica	Tipos de secadores más usuales			
	Regeneración en frío	Regeneración con calentador interno	Regeneración con calentador externo	Calor con corriente dividida
Gasto en la entrada (SCFM @ 100 psig)	1 a 5,000	1 a 1,000	300 a 5,000	300 a 30,000
Rango de temperatura en la entrada (°F)	60 a 120	60 a 130	60 a 130	60 a 130
Punto de Rocío a la salida (°F)	-40 a -100	-40	-40 con un ligero aumento al iniciar el ciclo	-40 a -80 con un ligero aumento al iniciar el ciclo
Rango de presión en la entrada (psig)	60 a 5,000	50 a 5,000	20 a 5,000	50 a 1,000
Suministro de energía para la regeneración	Ninguna	Electricidad	Electricidad o vapor	Electricidad o vapor
Gas usado para regenerar	Seco	Seco	Aire atmosférico	Gas a la entrada
Caída de presión (psid)	5 máximo	5 máximo	3 a 5	8 a 10
% de merma por regeneración @ 100 psig	15	2	0	0
% de fluctuación posible en el gasto	0 a 100	0 a 100	0 a 100	20 a 100
Requerimiento de agua para enfriamiento	NO	NO	NO	SI
Costo inicial	Moderado	Intermedio	El más alto	Alto
Costo de mantenimiento	Moderado	Intermedio	El más alto	Intermedio/alto

Fuente: Puromex, curso de secado y purificación de gases comprimidos.