

## **Ecuaciones de condensadores:**

Una clasificación amplia de los condensadores es la siguiente:

- Condensadores de mezcla:

a.1) Condensadores de chorro

a.2) Condensadores barométricos

- Condensadores de superficie:

b.1) Condensadores de equicorriente

b.2) Condensadores de contracorriente

b.3) Condensadores de flujo cruzado

### Transmisión de calor en el condensador:

El estudio de la transmisión de calor es de la mayor importancia para un proyecto racional de los condensadores. El calor pasa de la corriente de vapor que se condensa, a una temperatura parcialmente constante, (exceptuando pequeñas diferencias en el interior del condensador), a través de la pared del tubo, hasta el agua de refrigeración. La resistencia que se opone a la transmisión de calor se complica por las películas del vapor que se está condensando, que se forman en la parte exterior del tubo, y por las posibles incrustaciones debidas al agua del interior.

Reynolds y Osborne demostraron que los fluidos al avanzar por el interior de los tubos lo hacen en forma de corriente laminar o turbulenta, y que depende del valor de la siguiente expresión, llamada número de Reynolds:

*Ec 1.0*

D = Diámetro interno del tubo, (m)

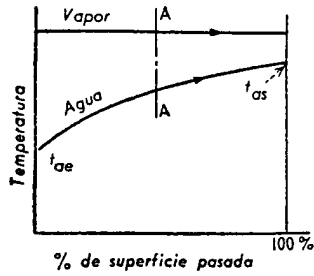
C = Velocidad del fluido, ( )

= Densidad del fluido en, ( )

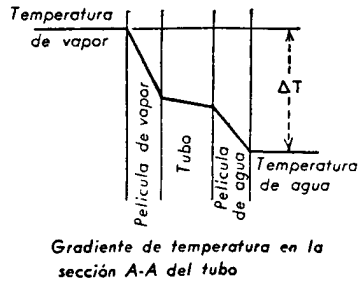
= Viscosidad del fluido, ( )

El límite superior del índice de Reynolds para corriente laminar se halla comprendido entre 2000 y 2100. En el condensador moderno, el agua circula en corriente turbulenta a una velocidad de 1 a 3 .

El gradiente de temperatura a través de la superficie total del condensador, si pudiéramos medir la temperatura del agua de circulación en puntos intermedios, desde la entrada hasta la salida, vendría representado en la figura 1.



Si investigamos la transmisión de calor a través de una pequeña porción de tubo AA, en contrariamos un salto de temperaturas compuesto por lo menos de cuatro partes:



Estos 'saltos' de temperatura son debidos a las siguientes resistencias de transmisión de calor:

- Resistencia de la película de vapor
- Resistencia del tubo
- Resistencia de la película de agua
- Incrustaciones del interior del tubo

Todos estos factores contribuyen a la caída total de la temperatura.

Para determinar la resistencia total a la transmisión de calor hay que considerar cada una de las resistencias parciales:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = R_2 = R_3 =$$

$$R_t = ++$$

En cada metro cuadrado de la pared compuesta, perpendicular a la dirección de corriente, se verifica:

$$S_1 = S_2 =$$

$$R_t =$$

Tomando como unidad  $S_1 = 1$ , el coeficiente de transmisión de calor  $U$ , será el inverso de  $R$ :

$$U = = Ec 1.1$$

$l_1, l_2, l_3$  = longitudes de las trayectorias del calor a través de la película de vapor, material del tubo y película de agua.

$K_1, K_2, k_3$  = coeficientes de conductibilidad térmica de la película de vapor del material del tubo y de la película de agua.

$S_1, S_2, S_3$  = superficies de la película de vapor, pared del tubo y película de agua.

$R_1, R_2, R_3$  = resistencias al paso de la corriente de calor opuestas por la película de vapor, el tubo y película de agua.

$D_e$  = diámetro exterior del tubo.

$D_i$  = diámetro interior del tubo.

El coeficiente de transmisión de calor  $U$  también puede estar expresado de la siguiente manera:

$$U = Ec\ 1.2$$

$U$  = Coeficiente de transmisión de calor

$t$  = Coeficiente de conducción del tubo

= Coeficiente de convección en el lado del agua

= Coeficiente de convección en el lado del vapor

*Cantidad de calor transmitido:*

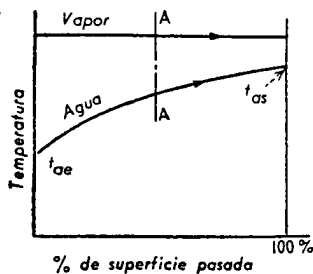
$$Q_{trans} = Ec\ 1.3$$

$A$  = área en  $m^2$ .

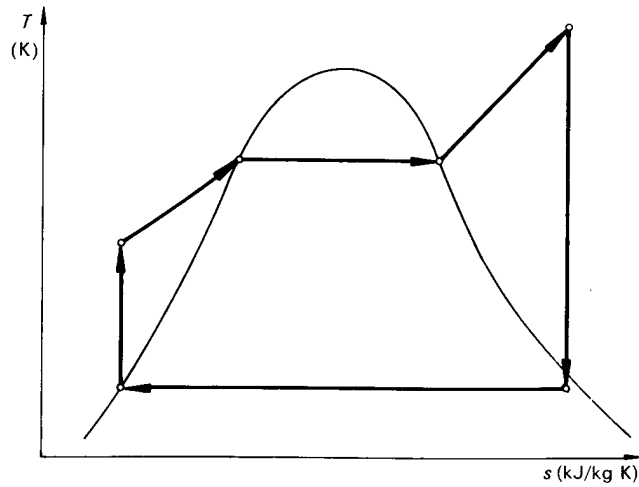
$t_{ml}$  = temperatura media logarítmica

Puesto que la temperatura del agua, desde la entrada a la salida, no varía según una ley lineal, no podrá hacerse uso de la media aritmética de la diferencia de temperaturas, por lo que se utiliza la siguiente fórmula:

$$t_{ml} = Ec\ 1.4$$



*Cantidad de calor cedido por el vapor:*



$$Q_{ced} = m v (h_A - h_B) = m v r_A \quad \text{Ec 1.5}$$

$m v$  = Masa de vapor.

$r_A$  = Calor latente de condensación.

*Cantidad de calor absorbido por el agua de refrigeración:*

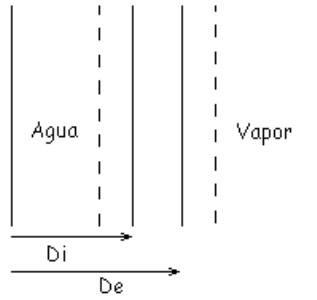
$$Q_{abs} = m_a c_e (t_{as} - t_{ae}) \quad \text{Ec 1.6}$$

$m_a$  = Masa de agua

$c_e$  = Calor específico del agua

$$Q_{abs} = Q_{ced} = Q_{trans} \quad \text{Ec 1.7}$$

Partiendo de la ecuación de la transferencia de calor (Ec 1.2) es necesario calcular  $\delta$  y  $\delta_v$  para poder encontrar su valor numérico.  $\delta$  es la película de agua en la superficie del tubo y  $\delta_v$  la película de vapor en la superficie del tubo.



$$U = Ec 1.2$$

*Cálculo de :*

Para el cálculo de se recurre a los grupos adimensionales:

*Reynolds*

$C$  = velocidad del agua en el interior del tubo hallada con la ecuación de continuidad

$D_i$  = diámetro interior del tubo

= densidad

= viscosidad dinámica

*Nusselt*  $Nu = Ec 1.8$

= coeficiente de convección en el lado del agua

$D_i$  = diámetro interior del tubo

= Coeficiente de conducción para el agua

*Mc Adams*  $Nu = Ec 1.9$

*Número de Prandtl*  $Pr = Ec 1.10$

$$m = 0,8$$

$$n = 0,4$$

$$c = 0,023$$

*Sieder y Tate (Corrección de la ecuación de Mc Adams)*

$$Nu = Ec \text{ 1.11}$$

$$c' = 0,027$$

$$n' = 0,25$$

$$m = 0,8$$

$a$  = viscosidad dinámica del agua

$s$  = viscosidad dinámica a la temperatura de la pared

Despejamos del número de Nusselt = *Ec 1.8*

*Cálculo de :*

Para el cálculo de se recurre a la siguiente fórmula:

$$= Ec \text{ 1.12}$$

$$Nt = Ec \text{ 1.13}$$

$v$  = Coeficiente de conducción del vapor

$g$  = Aceleración de la gravedad

$r$  = Calor latente de condensación

= Densidad

$Q$  = Diferencia de temperaturas entre la pared y el vapor

= viscosidad dinámica

Para el cálculo de ' $c$ ' utilizamos la ecuación de continuidad:

$$Ec \text{ 1.14}$$

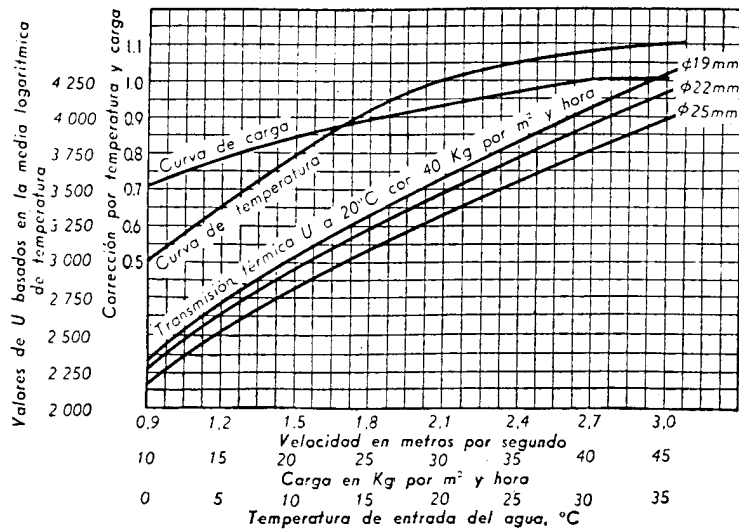
*Pérdidas de carga en condensadores de superficie:*

Podemos afirmar que el coeficiente de transmisión de calor crece con el aumento de la velocidad del agua por el interior de los tubos; que varía con la temperatura del agua, siendo mayor con altas que con bajas temperaturas, los tubos con pequeño diámetro interior dan un coeficiente de transmisión un poco mejor que los de diámetro mayor, debido a una mayor relación entre perímetro mojado y área transversal.

La limpieza y la condición de los propios tubos (liso, picado, ó incrustaciones), influyen de manera decisiva en la transmisión de calor, obteniéndose los mejores resultados con tubos perfectamente limpios y lisos.

En la figura 6 se muestran las curvas de los coeficientes de transmisión de calor con tres tamaños de tubos de , , 1 pulgada (19, 25 y 25 mm), que son los tubos más usados para obtener elevado transmisión de calor, gran

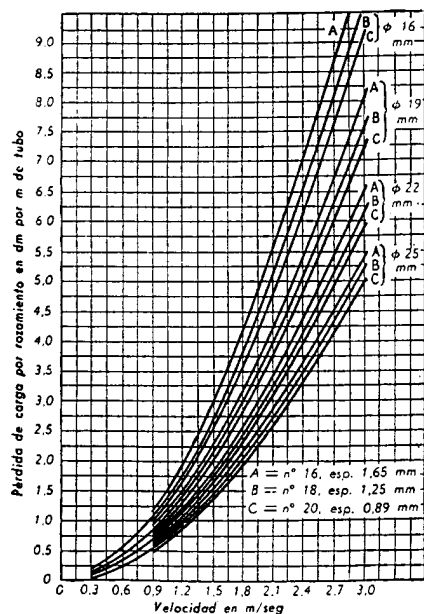
superficie por unidad de volumen del condensador y mínima cantidad de incrustaciones y suciedad.



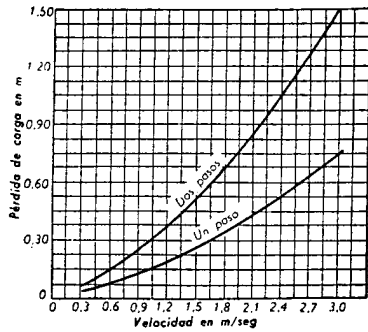
Entendemos por 'carga' la cantidad de vapor condensado por hora dividida por la superficie total del condensador. Si la temperatura de entrada del agua de circulación se aparta de los 20 °C, hay que hacer una corrección según la curva de temperaturas. Cuando la carga es parcial la superficie total del condensador, no trabaja con tanto rendimiento, por lo que hay que hacer una corrección según la curva de carga, a fin de deducir la transmisión de calor en esas condiciones.

Para seleccionar el condensador adecuado para cierta carga, no deben descuidarse las pérdidas de presión a través del condensador que varían a razón inversa a la transmisión de calor

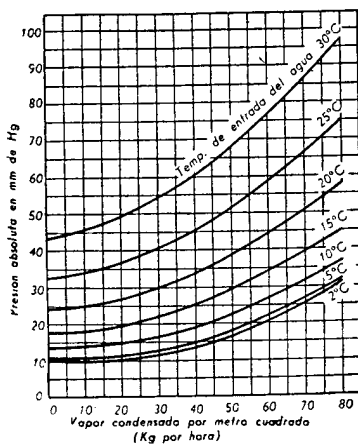
Las curvas de la figura 7 provienen de aplicar las ecuaciones de William y Hazen de la pérdida de presión hidráulica. Admitiéndose una tolerancia de un 15% por el estado de la limpieza de los tubos.



Las curvas de pérdidas de presión en las cajas de agua del condensador se muestra en la figura 8.



Teniendo en cuenta que el agua de circulación de los condensadores puede variar, es evidente que el vacío que se obtiene también variará siendo el máximo con agua fría. La carga de los modernos condensadores debe superar los 40, en la figura 9 se resumen las características del condensador en función de las características del agua.



## **DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL BIOFOULING.**

El biofouling se puede definir como la acumulación no deseada de depósitos, esencialmente microbiológicos, sobre una superficie artificial sumergida o en contacto con agua de mar. Esta acumulación o incrustación consiste en una película orgánica compuesta por microorganismos empotrados en una matriz polimérica creada por ellos mismos (biopelícula), a donde pueden llegar, y quedar retenidas partículas inorgánicas (sales y/o productos de corrosión) consecuencia de otros tipos de fouling desarrollados en el proceso.

La importancia del término más general fouling es vital en la industria, puesto que la aparición no deseada de este fenómeno provoca muchas pérdidas económicas a lo largo del año. A continuación se define dicho término y se hace una clasificación enfocada al campo industrial.

Existen seis tipos diferentes de fouling que son:

- Fouling biológico
- Fouling por reacción química
- Fouling por corrosión
- Fouling helado



- Fouling por partículas
- Fouling por precipitación
- ***Fouling biológico***

Debido a la acumulación de depósitos bióticos sobre una superficie. También se le suele denominar como fouling microbiano.

- ***Fouling por reacción química***

Son los depósitos formados por reacción química, en los que el soporte, por ejemplo los tubos de un condensador, no es un reactivo. La polimerización de los productos de una refinería de petróleo es un buen ejemplo de este tipo de incrustación.

- ***Fouling por corrosión***

El fouling por corrosión describe el proceso de formación de productos de corrosión sobre las superficies en contacto con un fluido como resultado de la corrosión electroquímica o microbiana de esta superficie. Este tipo de fouling a recibido muy poca atención en el pasado a pesar de la importancia que tiene para los diseñadores y operadores de equipos de intercambio de calor.

- ***Fouling helado***

Es la solidificación de un líquido, o de alguno de sus constituyentes, con un punto de fusión más alto, en una superficie enfriada.

- ***Fouling por partículas***

Es la acumulación sobre la superficie de un equipo de partículas sólidas que se encontraban suspendidas en el fluido procesado. Cuando existe fouling por partículas puede ocurrir que éstas se depositen sobre una superficie, dando lugar, a otro tipo de fouling denominado por sedimentación cuando la gravedad es el mecanismo primario que favorece la formación del depósito. Este tipo de fouling es el resultado de la presencia de sólidos suspendidos procedentes de fuentes diversas. La cantidad y velocidad de acumulación sobre la superficie, depende de la naturaleza y tamaño de los sólidos suspendidos así como de las condiciones térmicas e hidráulicas del sistema.

Los depósitos correspondientes a los sólidos suspendidos, generalmente son blandos y no se adhieren fuertemente a la superficie caliente.

- ***Fouling por precipitación***

Es la precipitación de sustancias disueltas sobre la superficie de un equipo. Este proceso se denomina encostramiento y está asociado a la formación de escamas cuando las sustancias disueltas han invertido las características de temperatura–solubilidad y la precipitación se produce en una superficie sobrecalentada. El fouling por precipitación puede ocurrir cuando sales disueltas de solubilidad inversa están presentes en el agua. Cuando el agua entra en contacto con la pared del tubo caliente se sobresatura, provocando la precipitación de las sales, tendiendo este precipitado a depositarse sobre la superficie del tubo. En el caso del encostramiento la temperatura de la superficie caliente tiene una gran influencia sobre el valor máximo de resistencia a la transferencia de calor, incrementándose éste cuando aumenta la temperatura de la superficie.

En la mayoría de los entornos de las plantas industriales en funcionamiento se produce más de un tipo de

fouling simultáneamente. En el caso del fouling microbiano no se limita solamente a procesos relacionados con actividades biológicas, también se incluyen procesos físico-químicos en la capa de cieno, asociados con los cambios en la superficie del equipo y reacciones en el fluido almacenado. La interacción puede intensificar algunos de los fenómenos observados más comúnmente, tales como el fouling por partículas, sedimentación y corrosión.

### **Control y eliminación del biofouling en un intercambiador de calor**

El método de eliminación conlleva la destrucción de los microorganismos implicados en el proceso de acumulación de biofouling. La destrucción o inactivación (descenso en su producción) de los organismos patógenos en el seno de un fluido implica la adición de productos químicos o métodos mecánicos que actúen violentamente sobre el depósito adherido a la superficie.

Las formas más idóneas para controlar el biofouling en un intercambiador de calor:

1. Tratamientos químicos

2. Limpiezas mecánicas

#### Métodos químicos:

Como se ha dicho anteriormente la adición de productos químicos es un proceso de desinfección, denominándose a los productos utilizados biocidas. Muchos de estos biocidas son capaces de oxidarse reaccionando con los compuestos orgánicos. De todos los desinfectantes químicos, el cloro es hasta el momento el más usado tanto en el tratamiento de aguas de refrigeración industrial como en los intercambiadores de calor. Este desinfectante se emplea en las plantas generadoras de energía eléctrica y en otras actividades industriales para el control del biofouling.

El sistema de cloración intermitente ha sido el método de aplicación más empleado para el tratamiento en plantas industriales.

La fuente más abundante de fouling es la adherencia de microorganismos sobre la superficie de los tubos del condensador y su posterior crecimiento. Una de las formas más efectivas de controlar el proceso de biofouling es mediante el uso de desinfectantes, para inactivar tanto las bacterias suspendidas en el agua de refrigeración como las adheridas sobre la pared del tubo dentro de la película biológica.

Los altos niveles de concentración de desinfectantes utilizados a menudo para controlar el biofouling provocan con frecuencia problemas medioambientales, El problema se agrava cuando los niveles de descarga permitidos por la administración no son suficientes para mantener el control del biofouling en los tubos de los equipos de intercambio de calor.

Por los motivos anteriormente expuestos numerosos estudios han tenido y tienen en la actualidad como objetivo, la minimización del empleo de cloro en la actividad industrial a fin de determinar el óptimo tratamiento desinfectante del agua de refrigeración, que a su vez mantenga en unos niveles aceptables el biofouling del equipo.

Las dos principales sustancias utilizadas para el control del biofouling han sido el cobre y el cloro. Para el control interno del biofouling el cobre se genera usualmente dentro del propio fluido mediante generadores electrostáticos y una corriente impresa sobre un ánodo del metal, el cual se disuelve.

El cloro es utilizado, a menudo, de forma directa sobre el fluido. Es importante señalar que en el momento de seleccionar el inhibidor adecuado para un sistema determinado deben tenerse en cuenta una serie de aspectos,

entre los que cabe destacar.

- Características del agua de refrigeración que utiliza el circuito.
- Características físicas del sistema a tratar (temperatura máxima del agua, velocidad del agua de refrigeración, zona de paso del agua y tiempo de retención hidráulico).
- Materiales de que está compuesto el sistema y equipos de intercambio térmico
- Disponibilidad del agua
- Estado del circuito antes de iniciar el tratamiento.
- Posibilidades de control y equipos de medida de los que se dispone.
- Límites de toxicidad en los vertidos
- Coste económico del tratamiento en función de las previsible condiciones de la operación

Los productos químicos más utilizados para tratamiento químico del agua de refrigeración:

- Dispersante
- Compuestos clorados
- Ozono

#### Métodos físicos:

Los métodos físicos de eliminación del biofouling en intercambiadores de calor son los más utilizados en los procesos de parada de la planta ya que son los más efectivos en cuanto acabado de limpieza.

Existen dos tipos de tratamientos mecánicos los *off-line* o los realizados durante los procesos de parada de la planta y los *on-line* que son los realizados cuando la planta esta en funcionamiento.

Los métodos mecánicos para este tipo de control de biofouling son: limpiezas mecánicas, inversión de flujo, tratamientos térmicos y variación de velocidad del agua.

#### *Limpiezas mecánicas:*

Existen dos métodos de uso frecuente y demostrada eficacia en el control del biofouling que son:

- a) Sistema de bolas de esponja o abrasivas
- b) Sistema de escobilla limpiadora alojada en canastas

La característica principal de estos métodos es que ambos son capaces de controlar cualquier tipo de fouling.

- a) Un sistema de limpieza mecánica mediante bolas de esponja ejerce su función de limpieza mediante la inyección periódica o continua de bolas de material elastómero dentro del condensador para que circulen a través de los tubos del condensador empujadas por el flujo de agua de refrigeración.

Las bolas están diseñadas y son inyectadas dentro de la caja de agua del condensador de forma que se distribuyen uniformemente dentro de ésta, pasando seguidamente por el interior de los tubos. Como las bolas de esponja son de mayor diámetro que el interior del tubo del condensador, al pasar por el tubo realizan el cepillado continuo de la superficie interior manteniendo el tubo limpio e impidiendo el asentamiento de los organismos responsables del fouling.

b) El otro sistema de limpieza mecánica es el de escobillas y canastas. Consiste en dotar al condensador de unas canastas situadas en uno y otro extremo de cada uno de los tubos. Las canastas contienen en su interior una escobilla de diseño especial y el sistema de refrigeración está dotado de la instalación necesaria para poder realizar la inversión del flujo del agua refrigerante. La canasta está diseñada para poder ser cambiada con rapidez en los procesos de inspección. El movimiento de la escobilla se realiza mediante la inversión del flujo del agua de refrigeración del condensador.

Los sistemas descritos anteriormente, de bolas de esponja y canastas–escobillas, son los dos métodos de limpieza mecánica más comúnmente empleados y que han demostrado ser eficaces en el mantenimiento de las condiciones de operación de una instalación industrial.

#### *Inversión de flujo:*

El sistema de limpiezas mecánicas de escobilla y canasta, va acompañado por el uso del método de inversión de flujo.

La inversión se consigue mediante la disposición del sistema de canalización que está diseñado para poder realizar esta función mediante un sistema de válvulas accionadas neumática o hidráulicamente dispuesto para tal fin.

En cada una de las inversiones de flujo, la escobilla, alojada en la canasta es impulsada hasta el otro extremo del tubo cepillando a su paso toda la superficie del tubo, para ser posteriormente recogida en la canasta opuesta. Posteriormente el flujo es invertido volviendo la escobilla a su posición original llevando a cabo un nuevo recorrido de limpieza. El cambio de flujo se efectuará con la periodicidad aconsejada según los factores que intervengan en cada planta en concreto, siendo el de más influencia el factor de calidad del agua. En la mayoría de los casos son necesarios solamente tres ciclos diarios para mantener unas buenas condiciones de operación en la planta.

#### *Tratamientos térmicos:*

Otro de los métodos de tratamiento alternativo para la eliminación del biofouling es el efectuado mediante calor.

El sistema de recirculación consiste en aumentar la temperatura del agua de refrigeración. Este aumento se consigue haciendo recircular el agua de refrigeración en circuito cerrado, es decir, no hay una renovación constante de agua fría, sino que por medio de un sistema de válvulas, se hace pasar el agua a la salida del condensador hacia la entrada, de tal forma que vaya aumentando paulatinamente la temperatura a media que pasa por el condensador.

#### *Variación de la velocidad del agua de refrigeración:*

El control del biofouling o microfouling se puede realizar utilizando la alta velocidad del agua a través de los tubos del condensador.

Desde el punto de vista del diseño, la velocidad del agua debe estar limitada, por un lado, las bajas velocidades tiende a incrementar la acumulación de biofouling. Por otro lado, sin embargo, las velocidades

altas están generalmente limitadas por los efectos de erosión–corrosión.

Los flujos de agua elevados pueden tener un efecto perjudicial en algunos casos, puesto que incrementan la velocidad de los procesos de corrosión y en particular los fenómenos de erosión–corrosión.

Los problemas relacionados con el flujo pueden aparecer inesperadamente durante el servicio, provocados por la obstrucción parcial de alguna parte del sistema. Si la fuente de suministro de agua no sea la adecuada o también que los sistemas filtrantes no sean los idóneos dando como resultado la aparición de los problemas relacionados con el biofouling.

Este fenómeno adquiere gran importancia en los intercambiadores de calor en los que los tubos pueden ser parcialmente bloqueados por la materia orgánica produciendo la estrangulación del flujo. La presencia de estas obstrucciones parciales puede dar como resultado la aparición de condiciones de turbulencia que pueden incrementar la velocidad del agua localmente y provocar fenómenos de erosión–corrosión perforando alguno de los tubos, mientras que los restantes del haz tubular permanecerán intactos.

### **EYECTORES DE AIRE**

La misión de los eyectores de aire es la eliminación del aire y de gases no condensables del condensador. Un eyector de aire no es más que una bomba de chorro en la que no existen partes móviles. El flujo a través de eyector se toma del colector de 10,34 bar de vapor auxiliar en la mayoría de los buques.

El grupo de eyección de aire (Fig. 6.5) está formado normalmente por:

- Eyector de aire de la primera etapa.
- Condensador intermedio.
- Eyector de aire de la segunda etapa.
- Condensador posterior.

Los dos electores (1ª y 2 etapa) trabajan en serie, el primero de ellos aspira de 3.81 cm de mercurio (abs) del condensador, y eleva esa presión hasta 17.78 cm (abs); en la segunda etapa, el eyector aumenta la presión de 7 pulgadas a 32 pulgadas (abs).

El eyector de la primera etapa aspira del condensador principal y descarga la mezcla de aire–vapor al condensador intermedio en el que el vapor contenido en la mezcla, se condensa. El condensado, cae al fondo del condensador, de donde, a través de un cierre hidráulico en U pasa el condensador principal.

El aire pasa ahora a la aspiración de la segunda etapa donde mezclado con el chorro de vapor es conducido al condensador posterior, en éste, el vapor se condensa y se manda al tanque de purgas en tanto que el aire se envía a la atmósfera.

Debe hacerse constar que el grupo de eyectores, elimina el aire solamente del condensador; el aire disuelto o en suspensión del condensado que pasa por el interior de los tubos no se elimina; el condensado sirve únicamente como enfriador en ambos condensadores, misión que realiza también en el condensador de vahos.

#### **Control y precauciones de seguridad en los eyectores de aire:**

Para permitir un funcionamiento continuo, se utilizan dos juegos de eyectores, sin embargo solo uno es necesario y suficiente para el funcionamiento de la planta; el otro, está en todo momento listo para funcionar

en caso de avería o defectos de funcionamiento del primero. Ambos pueden utilizarse simultáneamente en caso de que una entrada excesiva de aire en el condensador haga necesario una capacidad adicional de extracción de aire.

Antes de poner en funcionamiento un eyector de aire, la tubería de vapor debe purgarse para evitar que las gotas de agua puedan erosionar las toberas y las acumulaciones de la misma, hagan que los electores tengan un funcionamiento inestable.

Antes de cortar vapor a los eyectores debe comprobarse que el condensador tiene suficiente flujo de agua de circulación y que ha sido ventilado adecuadamente.

La recirculación (loop–seal) del condensador intermedio al principal, debe ser perfectamente estanca al aire, pues cualquier pérdida (entrada de aire) obligarla al agua del tubo en U a salir del mismo.

Si en alguna ocasión es necesario hacer funcionar ambos grupos de electores, probablemente existe una entrada excesiva de aire, es mejor y más conveniente localizarla y eliminarla, que hacer funcionar ambos grupos continuamente.

El funcionamiento inestable de un eyector de aire puede ser debido a alguna de las siguientes causas

- Baja presión del vapor a eyectores.
- Temperatura y clase de vapor diferentes de los previstos para el funcionamiento correcto.
- Incrustaciones o suciedad en las toberas.
- Posición inadecuada de la tobera respecto al difusor.
- Purgas del condensador (intermedio o posterior) cerradas u obturadas.

Los problemas que ocasiona la baja presión del vapor son debidos generalmente a un funcionamiento o ajuste inadecuados en la válvula reductora de vapor a eyectores. Es esencial que a las toberas llegue vapor seco y a la presión adecuada.

La existencia de erosiones o incrustaciones en las toberas es una evidencia de la admisión de vapor húmedo a las mismas. Las toberas defectuosas no trabajan correctamente y por lo tanto el vacío no puede mantenerse en sus valores máximos. En algunas ocasiones, las toberas pueden estar parcialmente obstruidas por grasa, compuesto de calderas o cualquier otra sustancia que disminuya su rendimiento.

### **FUNCIÓN PRIMARIA DE CONDENSADORES**

El constructor de máquinas de vapor debe tener en cuenta al proyectar una máquina que ésta no sólo sea capaz de producir el trabajo requerido, sino también que utilice un mínimo de energía térmica y, en consecuencia, consuma una cantidad mínima de combustible para efectuarlo. Suponiendo que las pérdidas debido a la fricción, a la conducción y radiación del calor, hayan sido reducidas a un mínimo aún queda una pérdida considerable de calor, llamada *energía térmica remanente en el vapor de evacuación*, que debe ser considerada'.

El vapor que descarga de una máquina, después de haber trabajado en ella, tiene una presión y temperatura inferiores a las que tenía cuando fue admitido a dicha máquina, pero este vapor está aún en condiciones de efectuar más trabajo, sí puede ser expandido aún más. Esta capacidad de poder efectuar un trabajo adicional, sí se disminuye la presión de descarga, es la *energía térmica remanente en el vapor de evacuación*.

El estudiante debe comprenderse de como una máquina, que reciba vapor a una cierta presión y temperatura, puede efectuar un trabajo adicional, haciéndolo descargar a la atmósfera (14,7 lbs/pulg<sup>2</sup> absolutas) en lugar de hacerlo descargar dentro de un ambiente donde la presión sea, por ejemplo, de 1,7 kg/ -CM' (25 lbs/pulg<sup>2</sup>) absolutas. El hacer descargar el vapor a la atmósfera es un problema simple, pero el vapor es capaz de efectuar aún más trabajo dentro de la máquina si se lo hace expandir hasta una presión inferior a la atmosférica, antes de hacerlo descargar de la máquina. Por ejemplo. la cantidad máxima de trabajo que puede producir un peso dado de vapor expandiéndolo desde una presión inicial de 42 kg/cm<sup>2</sup> (600 lbs/pulg<sup>2</sup>) absolutas y una temperatura de 454,4 °C, hasta una presión final de una atmósfera (14,7 lbs/pulg<sup>2</sup>) absolutas, es solamente el 64% de la cantidad máxima de trabajo que puede ser producido por la misma cantidad de vapor, en las mismas condiciones de presión y temperatura iniciales, si se lo hiciera expandir hasta un vacío de 29 pulgadas de mercurio (de presión de 736,6 mm de c. de Hg.).

Un condensador de vapor proporciona un espacio cerrado, dentro del cual puede descargar la máquina, y donde la presión se mantiene tan baja como sea económicamente factible con respecto a la atmosférica. Esto se lleva a cabo de dos formas. Primero, por condensación del vapor, de donde obtiene el nombre de *condensador*, y segundo, por la extracción del condensado y de los gases no condensables haciendo uso de bombas.

Si el condensador fuera perfectamente estanco al aire, y sí no hubiera aire o gases no condensable presentes en el vapor que descarga al condensador, solamente sería necesario condensar el vapor y extraer el condensado, con el objeto de crear y mantener el vacío. La rápida reducción del volumen del vapor que se transforma en agua produce vacío, y bombeando el agua de la parte baja del condensador, tan pronto como se va formando, se podría mantener el vacío así creado.

Sin embargo, como es prácticamente imposible evitar la entrada de aire y otros gases no condensables al interior del condensador, es necesario hacer uso de una bomba de aire o un eyector de aire para mantener el vacío en el interior del condensador.

La función primaria del condensador puede ser considerada, por lo tanto, como la de producir y mantener una baja presión de evacuación. La condensación, o la extracción del calor de vaporización del vapor de evacuación de una máquina, puede llevarse a cabo en una u otra de las siguientes formas.

- 1) Por medio de una pulverización de agua relativamente fría en una cámara, dentro de la cual se envía el vapor de evacuación de la máquina (intercambiador de calor de contacto directo o de mezcla);
- 2) Enviando el vapor de evacuación sobre un cierto número de tubos de metal enfriados interiormente por una corriente relativamente fría de agua de circulación (intercambiador del tipo indirecto o de superficie).

En ambos casos:

- a) La cámara del condensador debe ser cerrada, para evitar la pérdida del vacío debido a las entradas de aire.
- b) El vapor condensado, o agua, debe ser extraído en forma continua, para permitir un flujo constante de vapor de evacuación dentro de la cámara de condensación.
- c) Se debe agregar los dispositivos que permitan la extracción del aire y los gases no condensables que puedan haber entrado en el condensador, ya sea debido a pequeñas fugas, o con el vapor. Esto es necesario con el objeto de mantener el vacío.

En su forma más simple tenemos así que: *un sistema de condensación* consiste en un aparato destinado a convertir el vapor de evacuación en agua, y de una o varias bombas para extraer continuamente del condensador, dicha cantidad de agua, el aire y los gases no condensables.

## **FUNCIÓN SECUNDARIA DE LOS CONDENSADORES**

El condensador cumple otra misión muy importante en una instalación de máquinas, especialmente en el caso de las máquinas marinas y que consiste en la conservación de la reserva de agua dulce del buque.

El agua de mar normal contiene aproximadamente 1/32 de su peso de sales disueltas y materias sólidas. Estas sales se vuelven insolubles a una temperatura definida, son precipitadas por el aumento de la saturación, debido a la evaporación del agua, y, cuando se depositan sobre la superficie de calefacción de los tubos de las calderas, forman una capa no conductora la cual no sólo retarda enormemente la transmisión del calor a través de las paredes de los tubos, sino que contribuye a que rápidamente se deterioren y finalmente se quemen los tubos. Para evitar que estas sales penetren en las calderas, es necesario alimentarlas con agua pura. Debido a que la mayor parte de las aguas provenientes de tierra contienen cantidades variables de impurezas indeseables, y además, debido a que es imposible que el buque de guerra lleve la cantidad de agua dulce suficiente para satisfacer las necesidades de una navegación larga, toda el agua dulce utilizada en los buques de guerra es producida a bordo por destilación del agua de mar. Este proceso requiere el gasto de una considerable cantidad de vapor lo que significa el gasto de una cierta cantidad de combustible para producir ese vapor, por lo cual es indispensable que todo el vapor utilizado en la planta de máquinas sea condensado y devuelto al sistema de agua de alimentación en estado puro. Esta es, entonces, la función secundaria del condensador.

Además de sus funciones primaria y secundaria, un condensador puede ser utilizado también para dar altura de aspiración a las purgas de otros equipos o sistemas, y para aspirar el agua de suplemento para el sistema de alimentación desde los tanques de reserva, (adición de agua).

## **FUNCIONAMIENTO DE UN CONDENSADOR PRINCIPAL**

El condensador principal es un intercambiador de calor en el cual el vapor de evacuación que proviene de las turbinas se condensa al ponerse en contacto con una serie de tubos por cuyo interior circula agua de mar fría. El condensador principal es el receptor de calor del ciclo termodinámico y al mismo tiempo provee un medio para recuperar el agua de alimentación y devolverla de nuevo al circuito. Si imaginamos una planta propulsora en la cual no exista condensador principal y las turbinas tengan que evacuar a la atmósfera, y también la enorme cantidad de agua destilada que sería necesaria para aumentar una caldera que genera 75.000 Kgs de vapor por hora, se hace obvia la necesidad del condensador principal como medio de recuperar agua de alimentación.

El condensador principal se mantiene bajo un vacío que oscila entre 635 y 723.9 mm de mercurio, dependiendo del tipo de instalación, la cantidad de vapor que recibe (carga), la temperatura del agua de mar y la distancia entre los tubos. El vacío de proyecto para una instalación determinada viene dado en la especificación de cada instalación. Algunas (la mayoría) están proyectadas para trabajar a plena potencia con un vacío de 698.5 mm de mercurio cuando la temperatura del agua del mar es de 23.8°C.

Se dice con frecuencia que una máquina desarrolla mayor cantidad de trabajo útil si su evacuación la realiza en un espacio donde existe una presión baja que si la realiza en contra de presiones más altas.

Aunque es cierto, puede dar lugar a interpretaciones erróneas en el caso de una planta de vapor condensado, a causa de la utilización de la palabra *presión*.

La importancia de la presión de evacuación es debida a que dicha presión determina la temperatura a la cual el vapor se condensa. Como sabemos, un aumento en la diferencia de temperaturas entre la fuente (caldera) y el receptor (condensador) aumenta el rendimiento termodinámico del ciclo. Manteniendo por lo tanto el condensador con vacío, bajamos la temperatura de condensación del vapor y aumentamos la diferencia de temperaturas entre fuente y receptor, aumentando por lo tanto el rendimiento termodinámico del ciclo.



En un condensador, la causa principal del vacío (baja presión absoluta) es la condensación de vapor, ello es debido a que el volumen específico del vapor es mucho mayor que el volumen específico del agua. Debido a que el condensador está lleno de aire, cuando no está en funcionamiento, y que durante el mismo existen asimismo algunas entradas de aire, la condensación del vapor no es suficiente para lograr el vacío inicial y mantenerlo durante el trabajo. En los buques modernos, se utilizan eyectores para eliminar el aire y los gases no condensables y aunque la principal causa del vacío es la condensación del vapor, los eyectores de aire consiguen establecer el vacío inicial y ayudar a mantener el vacío adecuado durante el funcionamiento.

Cuando la temperatura del agua de mar es relativamente alta, los tubos del condensador aumentan de temperatura y la transmisión de calor se hace más lenta; debido a ello un barco navegando en los trópicos no puede mantener un vacío tan alto como lo haría otro en aguas más frías.

Para el correcto funcionamiento de los condensadores deben tenerse en cuenta dos reglas básicas:

– *La temperatura de descarga al mar del agua del condensador debe estar alrededor de  $-12.22^{\circ}\text{C}$  por encima de la de entrada.*

– *La temperatura de descarga del condensado debe ser ligeramente inferior a la correspondiente al vacío del condensador.*

La siguiente lista indica las relaciones entre vacío y su correspondiente temperatura.

*Cm de Mercurio*

75.18 .....	11.6
74.67 .....	17.77
74.16 .....	22.22
73.66 .....	26.11
73.15 .....	29.44
72.64 .....	32.22
72.13 .....	34.44
71.62 .....	36.66
71.12 .....	38.33
70.61 .....	40
70.10 .....	41.66

Todos los condensadores, llevan dos circuitos. El primero es el de vapor–condensado, en el cual el vapor de evacuación de la turbina entra al condensador por la parte superior y se condensa a medida que se pone en contacto con la superficie externa de los tubos; el condensado cae a la parte baja del condensador, al "*pozo caliente*" y de allí es aspirado por la bomba de extracción de condensado. El aire y los gases no condensables que entran mezclados con el vapor o de algún otro modo, se extraen por medio del eyector de aire a través de su aspiración, situada en el casco del condensador, por encima del nivel de condensado.

El segundo circuito, es el formado por el agua de circulación. Durante el funcionamiento, un sistema de inyección por cuchara provee automáticamente la cantidad de agua necesaria para la circulación por el condensador. La cuchara, que está en comunicación con el mar, dirige el flujo de agua a través de la tubería de inyección al cabezal y placa de tubos de entrada, de ahí pasa a través de los tubos a la placa de salida y cabezal de salida de donde se descarga al mar.

La bomba de circulación principal provee la necesaria cantidad de agua a través del condensador cuando la cuchara por razones de velocidad no es efectiva.

Todos los condensadores principales provistos de inyección por cuchara, son del tipo de tubos rectos y paso simple. Los tubos son de cupro-níquel y su número dependiendo de la potencia de la planta propulsora oscila entre 2.000 y 10.000; sus extremos van expandidos en la placa de entrada y expandidos o empaquetados en la de salida, ambas placas son los elementos que separan el circuito de vapor-condensado del de agua de circulación.

Para permitir la expansión y contracción del casco y tubos del condensador, se utilizan diferentes sistemas. El empaquetado en la placa de tubos de salida es uno de los sistemas que permiten la y contracción de los tubos. Cuando van expandidos en ambos extremos, es necesario colocar una junta de expansión en la envuelta; asimismo se colocan juntas de expansión en la tubería de inyección de la cuchara y en la de descarga al mar. Los condensadores van también provistos de soportes flexibles o deslizantes para absorber las diferencias de dilatación entre la envuelta y la estructura que la soporta.

Existe un paso central de vapor desde la parte superior del condensador y a través del haz de tubos hasta el pozo caliente, este paso obliga al vapor a extenderse bajo el haz de tubos en la dirección de la sección de enfriamiento de aire, evitando así que el aire vaya al pozo caliente. Parte de este vapor se condensa al caer sobre él las gotas de condensado, calentando a este (que ha sido subenfriado en los tubos) a una temperatura cercana a la de vaporización correspondiente al vacío existente.

La diferencia entre la temperatura del condensado a la de salida del condensador y la temperatura de condensación correspondiente al vacío del condensador indica el rendimiento de un condensador y debe mantenerse lo más pequeña posible. Si esta diferencia de temperatura es demasiado alta, es decir, el condensado está excesivamente frío, tendremos que calentarlo a lo largo del circuito de alimentación, con el consiguiente gasto adicional de vapor; asimismo una diferencia alta hace que el condensado disuelva más aire, con la consiguiente necesidad de eliminarlo para evitar el efecto corrosivo del oxígeno en tuberías y calderas.

Los condensadores principales llevan interiormente una serie de pantallas, con objeto de separar el vapor del aire y evitar así que los eyectores de aire aspiren cantidades excesivas de vapor mezclado con el aire. Las secciones de enfriamiento de aire y las pantallas separadoras podemos verlas en la figura.

*En algunas instalaciones, el condensador va colgado de la turbina de baja presión de forma que esta soporta al condensador, en este caso, se colocan soportes uniendo la parte baja del condensador a la estructura del casco para evitar los daños producidos por los balances. En algunos condensadores, parte del peso del condensador se absorbe por medio de muelles que unen la parte baja al casco.*

El rendimiento de un calcularse midiendo y comparando las energías que entran y salen de él.

La energía que entra está formada por:

La energía cinética del vapor entrante.

La energía térmica del vapor entrante.

La energía cinética del agua de mar entrante.

La energía cinética térmica del agua de mar entrante.

La energía que sale está formada por:

La energía cinética en la salida del condensador.

La energía térmica del condensado.

La energía cinética del agua de mar a la descarga.

La energía térmica del agua de mar a la descarga.

Sin embargo considerando un condensador real, las energías cinética de entrada y salida del agua de circulación son pequeñas y podemos considerar que se anulan una con otra, las energías cinética de entrada del vapor y salida de condensado, pueden asimismo despreciarse; luego en el balance energético, puede solamente considerarse:

Energía térmica de entrada del vapor y agua sólida.

Energía térmica de salida del condensado y agua salada.

## **PRESIÓN ÓPTIMA**

### **Funcionamiento de un condensador principal:**

(1) Vacío requerido.

Las plantas de condensación deben ser conducidas en forma de obtener un vacío más estable y de acuerdo con la instalación para el cual han sido diseñadas.

El vacío requerido para el funcionamiento de máquinas alternativas a su máximo rendimiento no sobrepasa de los 660mm de mercurio. La razón de ello es que el volumen específico aumenta a medida que aumenta el vacío, de este modo, con bajas presiones, se alcanza un volumen de vapor excesivo, y las lumbreras de evacuación no pueden ser tan grandes como para darle salida al vapor. Esto requiere un cilindro de baja presión muy grande, y el costo inicial, así como también las dificultades de funcionamiento no compensan lo que se quiere ganar. Los límites a este respecto son tan restringidos en el funcionamiento de las turbinas y en estos tipos de instalaciones el vacío puede ser aumentado hasta de 724 a 737 mm de Hg.

Cada instalación de turbinas está diseñada para funcionar a toda fuerza con un vacío, definido. El vacío de diseño para cualquier instalación particular de máquinas puede ser obtenido de los manuales respectivos.

El grado de vacío para el cual está diseñada una turbina en gran parte queda determinado por la longitud de las paletas correspondientes a las hileras de descarga en la turbina de baja presión, pues deben ser tales que permitan la evacuación del volumen aumentado del vapor en esa etapa. Se debe tener en cuenta que haciendo la paleta larga se requiere un aumento de peso y espacio para la turbina de baja presión, lo cual no siempre es conveniente. Con alto vacío el volumen específico del vapor aumenta enormemente. Por ejemplo: se duplica para un aumento de 711.2 a 736.6 mm y es aproximadamente dos veces superior entre vacíos de 736.6 a 749.3 mm de Hg.

Como resultado de este gran aumento del volumen del vapor y las limitaciones constructivas de peso y

espacio, es práctica general en el diseño de turbinas marinas adoptar un vacío de alrededor de 698,3 mm. de Hg. en la descarga de la última hilera de paletas de la turbina de baja presión, cuando la misma desarrolla su máxima potencia. Entre este punto y el condensador hay una nueva caída de presión por la fricción del vapor en el paso o tubo de evacuación. Por esta razón es usual diseñar el condensador para 711 mm de vacío a toda fuerza. El diseño antes mencionado se basa en que existe solamente una cantidad normal de aire en solución. Desarrollando la planta su máxima potencia cualquier elevación sobre el vacío de diseño no origina aumento de potencia ni economía, solamente mostrará que los aparatos de condensación están en buenas condiciones y que no tienen ninguna fuga anormal de aire. Esto es debido a que el área de las paletas son proporcionadas de manera tal que el efecto del aumento no se extiende más allá de la última o penúltima etapa de expansión. De ser posible obtener una mayor potencia mediante el aumento del vacío, más que un beneficio resultará una pérdida, debido al consumo originado por el mayor trabajo de las auxiliares para conseguir dicho aumento. En cambio, sí el vacío es *menor* que el de diseño, el efecto se extiende a varias etapas de expansión, lo que da por resultado la necesidad de una mayor cantidad de vapor para desarrollar la misma potencia. Cuando la turbina funciona desarrollando una potencia menor que el máximo, el efecto del vacío debido a la disminución del flujo de vapor se extiende a través de un cierto número de etapas de expansión. Bajo estas condiciones un aumento de vacío tendrá el efecto de disminuir el consumo de vapor, que tendrá entonces mayor cantidad de energía disponible.

## (2) Determinación del vacío.

Si en un condensador se pudiera obtener un vacío perfecto, la presión absoluta sería 0; el cero absoluto se encuentra 1,033 Kg/cm<sup>2</sup> por debajo de la presión atmosférica, cuando la presión atmosférica o barométrica es de 76 cm. de columna de mercurio. Cuando se obtiene solamente un vacío parcial, existe cierta presión absoluta dentro del condensador en correspondencia con dicho vacío.

La presión absoluta y la temperatura para el vapor de agua saturado, o para una mezcla de vapor y líquido, están relacionados debido a que la presión absoluta es función solamente de su temperatura. Es decir, para cualquier temperatura la presión es fija y definida, y cualquier cambio de temperatura produce el correspondiente cambio en la presión absoluta. Por lo tanto, en un condensador, si el vapor que se condensa está exento de aire o de gases no condensables, la temperatura del mismo será la correspondiente a su presión absoluta. Sin embargo, es imposible tener en el condensador vapor totalmente libre de aire, debido a la absorción del aire por el agua de alimentación y a las pérdidas existentes a lo largo del sistema bajo vacío. En consecuencia, la temperatura del vapor en un condensador es la correspondiente a la presión debida al vapor de agua *puro* que se encuentra presente.

*La presión total en un condensador es la suma de las presiones debidas al vapor de agua puro, más la del aire y más la de cualquier otro gas que se halle en solución*

Para determinar la presión absoluta se conecta un vacuómetro exacto a la cámara del condensador. La diferencia entre la lectura de este vacuómetro y un barómetro, es igual a la presión absoluta que hay en el condensador expresada generalmente en mm de c., de mercurio. La diferencia entre la presión absoluta así obtenida y la presión correspondiente a la temperatura de la cámara de condensación, es la presión parcial debida al aire en solución, y por lo tanto, es la medida de las pérdidas de aire existentes en el sistema. Si existe aire en el condensador, el termómetro indicará un mejor vacío que el real.

El efecto que produce el aire sobre la temperatura en el tubo de evacuación durante el funcionamiento de la máquina es insignificante debido a que la relación entre el aire y el vapor es tan pequeña que un termómetro colocado sobre dicho tubo marcará la temperatura que corresponda al vacío en ese punto.

El efecto del aire sobre la temperatura en el condensador es mucho mayor, pues a medida que el vapor lo recorre y se condensa, la proporción de aire en el vapor aumenta rápidamente. Si en el lugar donde se alcanza la condición de igualdad entre los pesos de aire y de vapor, se coloca un termómetro, la temperatura

(correspondiente a la presión parcial de vapor solamente) en ese punto puede ser unos 5 a 101 °C más baja que la correspondiente a la presión absoluta total. El termómetro puede indicar 26°C correspondiente a un vacío de 73,66 cm. y el vacuómetro marcar solamente 71,12 cm., ambos indicadores dan una medida correcta, marcando el vacuómetro el vacío actual en el condensador.

### (3) Extracción del aire.

Si en la evacuación del vapor al condensador no existiera aire, la bomba de aire sería innecesaria; una bomba para extraer el condensado sería suficiente para cumplir con las necesidades. Como ya hemos visto, en la realidad no se cumple, por lo tanto, la bomba de aire y los eyectores se instalan en forma adecuada para eliminar el aire que normalmente llega al condensador.

El aire debe ser extraído exactamente en la misma cantidad que entra, con el objeto de mantener el equilibrio correcto del sistema de condensación. La cantidad de aire que debe ser extraída depende de la cantidad que ha penetrado en el sistema por las *fugas*. El condensador, las tuberías y en general todas las partes sometidas a presiones inferiores a la atmosférica deben ser mantenidas en buenas condiciones de estanqueidad. En especial los prensas deben funcionar en forma apropiada, con el objeto de asegurar una mínima absorción de aire. El grado de funcionamiento de los eyectores de aire puede ser aumentado para compensar la pérdida de vacío debido a un exceso de aire que entra al sistema, pero este procedimiento no es el más eficiente.

*Es importante cuidar que el condensador permanezca exento de aire tanto como sea posible porque su presencia dificulta la transmisión del calor del vapor de agua al agua de circulación, restándole eficiencia al condensador.*

La presencia de aire no sólo ocasiona pérdidas de calor, sino que al ser absorbido por el agua puede ocasionar corrosiones en el sistema de vapor. A pesar de que la función del tanque desaireador del agua de alimentación es la de extraer el aire disuelto, en la forma más efectiva posible, es conveniente que el condensador descargue el condensado conteniendo tan poca cantidad de aire disuelto como sea posible.

La mayor parte de los condensadores trabajan con no más de 0.05 cm cúbicos de oxígeno por litro de agua condensada.

***Fig2***

***Fig 1***

A

B

Pcond

***Fig 3***

***Fig 4***

***Fig 5***

**Fig 6**

**Fig 7**

*Pérdidas por rozamiento*

*en los tubos de condensadores*

**Fig 8**

*Curvas para determinar las pérdidas en la caja de agua de un condensador*

*Funcionamiento típico de un condensador de superficie de dos series.*

*Las curvas corresponden a una cantidad constante de agua circulatoria*

**Fig 9**

*Curvas de transmisión de calor para condensadores de superficie destinados a turbinas*