

Módulo: Gestión Eficiente de la Energía

EQUIPOS CONSUMIDORES DE ENERGÍA EN EL SECTOR INDUSTRIAL

AUTOR: JESÚS PEDRO GARCÍA MONTES
COLABORACIÓN LEIDY BÁEZ CAPELLÁN

eoi

Índice

	<u><i>Página</i></u>
1. GENERACIÓN DE VAPOR.....	5
2. HORNOS.....	20
3. CONCENTRACIÓN DE SOLUCIONES. EVAPORADORES	38
4. MOTORES ELÉCTRICOS	60
5. SECADO	82
6. INTERCAMBIO DE CALOR.....	114

eoi

eoi

Generación De Vapor

eoí

Introducción

Se ha elegido el término “Generador de Vapor” en vez de “Caldera de Vapor” por no ser claro este último. Por caldera de vapor se entiende solamente aquella parte de la instalación regada por agua y vapor, que consta del calderín y de los tubos vaporizadores. En cambio, el generador de vapor consta de la caldera (Vaporizadores), así como del recalentador, recalentador intermedio, precalentador del agua de alimentación (economizador) y precalentador de aire.

Pertenece también a la instalación del generador de vapor las máquinas auxiliares para la entrada del combustible, las bombas de agua de alimentación, el ventilador, el aspirador, el extractor de polvo, así como el equipo de medición y regulación.

El concepto de la potencia del generador de vapor se halla fijado por la norma DIN 2901. La potencia máxima permanente, en las condiciones de presión y temperatura estipuladas en el contrato de suministro.

Clasificación de los Generadores de Vapor.

Los generadores de vapor se clasifican según Los criterios enumerados a continuación:

1º Disposición de los fluidos.

- A) De tubos de agua (acuotubulares).
- B) De tubos de humo (pirotubulares).

2º Circulación de los fluidos.

- A) De circulación natural.
- B) De circulación asistida.
- C) De circulación forzada.

3º Transmisión del calor.

- A) De convección
- B) De radiación.
- C) De radiación y convección.

4º Combustible.

- A) De carbón (parrilla mecánica o carbón Pulverizado).
- B) De combustibles líquidos.
- C) De combustibles gaseosos.
- D) De combustibles especiales(licor negro Bagazo, desperdicios de madera, etc.)
- E) De recuperación de calor de gases (con o sin combustión adicional).

5º Presión de trabajo.

A) Subcríticos:

De baja presión

$P < 20 \text{ kg/cm}^2$

De media presión

$20 < p < 64 \text{ kg/cm}^2$

de alta presión

$p > 64 \text{ kg/cm}^2$

B) Supercríticos.

6º Tiro.

- A) De hogar presurizado.
- B) De hogar equilibrado.

7º Sistema de apoyo.

- A) Generadores apoyados
- B) Generadores suspendidos.

8º Lugar de montaje

- A) Montados en taller.
- B) Montados in situ.

9º Implantación.

- A) Terrestres
- B) Marítimos

10º Ubicación

- A) Intemperie
- B) Protegidos contra intemperie

11º Operación.

- A) Automáticos.
- B) Semiautomáticos.
- C) De operación manual

La peculiaridad básica de la transformación del agua en vapor consiste en que este proceso transcurre con suministro ininterrumpido de calor al agua en ebullición, a temperatura constante del agua, que depende solamente de la presión a que se produce la vaporización. Exactamente la misma temperatura que el agua en ebullición tiene el vapor que de ella se forma. Dicha temperatura se denomina temperatura de saturación. El vapor en estas condiciones se denomina vapor saturado. La temperatura de saturación aumenta al elevarse la presión y con ello aumenta también la cantidad de calor gastado en el calentamiento del agua hasta la temperatura de saturación. Dicha cantidad queda absolutamente determinada por la presión.

La cantidad de calor necesario para calentar el agua desde la temperatura de 0º hasta la de saturación se denomina entalpía del líquido; se expresa en kilocalorías por kg (kcal/kg) y se designa por h' .

El calor invertido en la transformación del agua en vapor, lo que se produce a temperatura invariable se denomina calor de vaporización; se designa con la letra r y se expresa también en kcal/kg. El calor de vaporización del agua es una magnitud perfectamente determinada para cada presión y disminuye a medida que aumenta ésta.

Si a la entalpía del agua h' se añade el calor de vaporización r , se obtiene la denominación entalpía del vapor:

$$H' = h' + r \text{ (kcal/kg)}$$

Esta, al igual que las restantes magnitudes características de las propiedades del agua y del vapor a la temperatura de saturación, es una magnitud que depende únicamente de la presión.

El vapor recalentado se diferencia del saturado por el hecho de que su temperatura y entalpía son superiores y porque su estado es más parecido al gas; en él no hay partículas de humedad y el peso específico es menor que el del vapor saturado de la misma presión.

El aumento de los parámetros, o sea, de la presión y de la temperatura del vapor empleado en las instalaciones de vapor, contribuye al aumento del rendimiento de estas instalaciones y a la disminución del gasto de combustible en la producción de energía eléctrica. Las propiedades físicas del agua y del vapor en relación con la temperatura y la presión son conocidas por vía experimental y se hallan resumidas en las tablas y en el diagrama de Mollier.

Pérdidas por los humos.

Fórmula de Siegert.

Las pérdidas por calor sensible en los gases de escape de una caldera vienen dadas por la fórmula de Siegert:

$$P_g = K \frac{t_g - t_a}{CO_2 + CO}$$

en dónde:

P_g = Pérdidas por calor sensible en % del poder calorífico Inferior del combustible.

K = Constante, según la clase de combustible, denominada coeficiente de Hassenstein.

T_g = Temperatura de los gases.

T_a = Temperatura del aire

CO_2 = % en volumen de anhídrido carbónico contenido en los gases de escape en el punto de medición de t_g

CO = % en volumen de óxido de carbono contenido en los gases de escape.

De la fórmula de Siegert se deduce inmediatamente que para un mismo combustible y determinado exceso de aire (CO_2 fijo), las pérdidas por los humos disminuyen al decrecer t_g , es decir, la temperatura de los gases.

Dichas pérdidas se pueden reducir hasta el 7% aproximadamente en las mejores condiciones para instalaciones convencionales.

Para un fuel-oil con $t_g = 160^\circ\text{C}$ y $\text{CO}_2 = 13\%$.

$$P_g = 0,58 \frac{160 - 20}{13} = 6,25\%$$

Para una antracita con 25% de agua y $\text{CO}_2 = 16\%$, $k=0,749$.

$$P_g = 0,749 \frac{160 - 20}{16} = 6,55\%$$

En instalaciones convencionales, las pérdidas no pueden reducirse disminuyendo t_g ya que por debajo de los 150°C aparece el punto de rocío ácido, condensándose el sulfúrico procedente del azufre del combustible que destruye las partes frías de las calderas (economizador y precalentador de aire).

Sin embargo, con técnicas especiales (empleo de precalentadores de aire de vidrio al borosilicato) es posible enfriar los gases a 100°C , con lo cual las pérdidas se reducen al 4% aproximadamente

Finalmente queremos aclarar que la fórmula de Siegert es una fórmula aproximada, con exactitud suficiente para fines técnicos.

Cálculo exacto.

El cálculo exacto de las pérdidas por los humos de una caldera se realiza por la siguiente expresión:

$$P_g = \frac{[G + L(n - 1)] CP (t_g - t_a)}{H_u} 100$$

Siendo:

G: Volumen de gases en Nm³ formados en la combustión estequiométrica de un kg de combustible.

L: Volumen de aire en Nm³ requerido para la combustión estequiométrica de un kg de combustible.

N: Exceso de aire.

CP: Calor específico medio en Kcal/°C. Nm³.

H_u: Potencia calorífica inferior del combustible en Kcal/Kg.

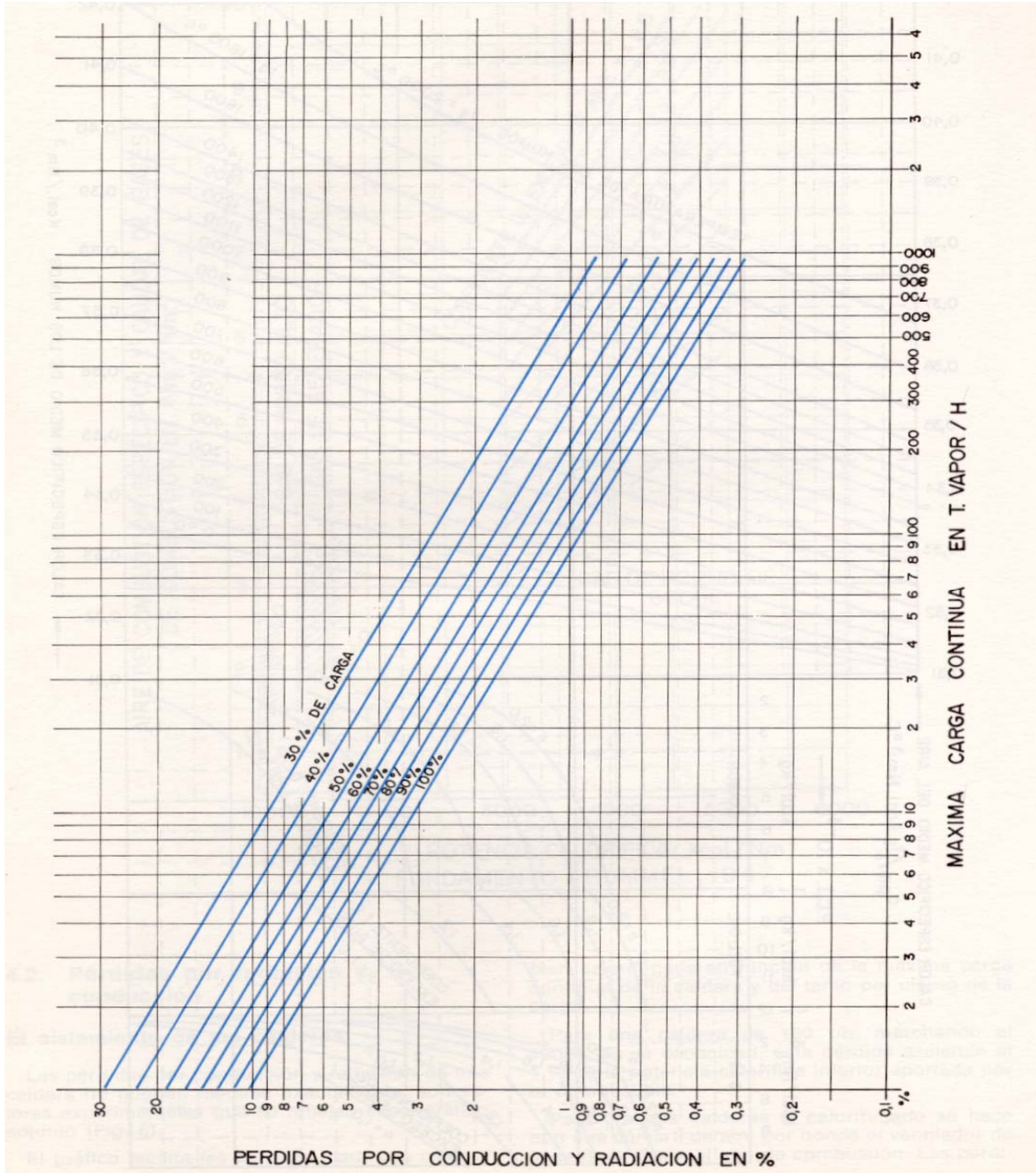
T_g y T_a: Tienen el mismo significado que en la fórmula de Siegert.

Pérdida Por Radiación y Conducción.

El Aislamiento de las Calderas.

Las Pérdidas por conducción y radiación de una caldera no pueden medirse exactamente; son valores experimentales que se reflejan en la Figura 1

**Figura 1 - Generación de Vapor.
 Pérdidas por Conducción y Radiación en Función de la Máxima Carga Continua de
 una Caldera**



La Figura 1 facilita las pérdidas para una caldera bien calorifugada en función de la máxima carga continua de la caldera y del tanto por ciento de la carga.

Para una caldera de 100 t/h, marchando al 100% de su capacidad, esta pérdida asciende al 1% de la potencia calorífica inferior aportada por el combustible.

Para grandes calderas el calorifugado se hace con una cámara de aire por donde el ventilador de la caldera aspira el aire de combustión. Las pérdidas pueden reducirse en este caso a la mitad de las indicadas en la Figura 1.

Rendimiento de un Generador de Vapor.

El Rendimiento η de un generador de vapor es la relación entre la cantidad de calor Q_v transmitido al agua y el vapor en el generador durante el ensayo y la cantidad de calor Q suministrada al mismo tiempo al generador de vapor por el combustible y el aire.

La ecuación general utilizada para la determinación del rendimiento es por lo tanto:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q} \langle \rangle 100 \frac{Q_v}{Q} \%$$

La cantidad de calor Q_v del numerador en la fórmula del rendimiento se compone de la absorción de calor en el economizador, en el prevaporizador y evaporizador y en el recalentador y recalentador intermedio si existe.

Al Calor Q del denominador, suministrado al generador de vapor, corresponden el calor del combustible (expresado en función de la potencia calorífica inferior) el calor del aire de combustión precalentado aparte, así como el calor suministrado por gases de escapes de procedencia ajena (como en las calderas de recuperación).

Existen dos métodos para poder determinar el rendimiento de un generador de vapor:

- a) Método directo: exige la averiguación del calor del combustible y del aire que le ha sido suministrado durante el ensayo y del calor absorbido al mismo tiempo por el agua y el vapor.

- b) Método indirecto: precisa la averiguación de todos los términos de las pérdidas en el balance térmico.

Ambos métodos son fundamentales equivalentes.

Para la elección del método son esenciales las posibilidades de medida existentes. De poderse apreciar con suficiente exactitud la cantidad de combustible y su poder calorífico, es más sencillo aplicar el método directo.

Fórmulas aplicables en ambos métodos:

Método Directo:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q} 100 = V \frac{(h_v - h_a)}{C * H_u} 100$$

en dónde:

η : Rendimiento del generador expresado en %

V: Cantidad de vapor en kg/h

h_v : Entalpía del vapor en kcal/kg

h_a : Entalpía del agua de alimentación en kcal/h

C: Cantidad de combustible en kg/h

H_u : Potencia calorífica inferior del combustible en kcal/kg

Método Indirecto:

$$\eta = 100 - \Sigma P = 100 - P_g - P_i - P_r - P_p$$

en dónde:

P_g : Pérdida por los gases.

P_i : Pérdidas por inquemados (sólidos y gaseosos)

P_r : Pérdida por radiación.

P_p : Pérdida por purgas

Sobre las tolerancias de las medidas y sobre las tolerancias de ambos métodos con ejemplos prácticos, puede consultar el lector la norma DIN 1942 (Abnahmeversuche an dampferzeugern: Ensayos de recepción para generadores de vapor). Existe traducción al castellano publicada por editorial Balzola (Bilbao).

Reducción de las pérdidas por inquemados.

Los Inquemados gaseosos se refieren principalmente a los combustibles líquidos y gaseosos y los inquemados sólidos principalmente al carbón.

Las Técnicas para reducir los inquemados gaseosos son:

- aumentar la temperatura del hogar.
- prolongar el tiempo de permanencia.
- incrementar la turbulencia.
- reducir el tamaño de gota o partícula.
- trabajar con un exceso de aire adecuado.

Los inquemados gaseosos en una combustión correcta rara vez sobrepasa el 0,2% de $CO + H_2$ y su influencia sobre el rendimiento de la caldera es muy escasa, pero los inquemados sólidos alcanzan a veces proporciones alarmantes. Estos quedan retenidos entre las cenizas del carbón acompañado a la escoria y a la ceniza volante.

La escoria se recoge en la tolva de la caldera (fondo del hogar), mientras que la ceniza volante, que acompaña a los humos, se deposita en los ciclones o en el electrofiltro.

La cantidad de inquemados de la escoria es del orden del 1-2% en peso; en cambio, en la ceniza volante puede alcanzar proporciones del orden del 15-20% en peso de la misma.

En las grandes calderas, con extracción seca de escoria y gran contenido en cenizas del carbón, cada dos puntos de inquemados recogidos en el electrofiltro pueden suponer una pérdida de rendimiento del 1% aproximadamente.

Desde el punto de vista de inquemados sólidos, en las grandes instalaciones interesan calderas con un gran grado de fijación de escoria B (proporción de la ceniza del carbón que queda fijada en la tolva del hogar en forma de escorial) y poca ceniza volante.

La técnica para reducir los inquemados sólidos y aumentar sensiblemente el rendimiento, es emplear un hogar con un gran valor de B.

La preparación del combustible. Necesidad de pulverización del combustible.

El tamaño de las partículas de un combustible (tamaño de gota en los combustibles líquidos y finura de molienda en los combustibles sólidos) influyen tanto en la seguridad de encendido, estabilidad de llama, intervalo de regulación y porcentaje de inquemados, que la presencia de pequeñas partículas de carbón o pequeñas gotas de aceite es de la mayor importancia.

La pulverización del combustible se consigue en el quemador en los combustibles líquidos y en el molino en los sólidos.

Trataremos primeramente los combustibles líquidos. El quemador en este caso se puede enfriar como una máquina de combustión. Su función es mezclar el combustible finamente pulverizado o evaporado con el aire comburente. Según el tipo de pulverización se puede dividir en quemadores de pulverización mecánica, por fluido auxiliar (aire, agua, vapor) o de copa rotativa.

La viscosidad es la característica más importante de un combustible líquido que se ha de tener en cuenta para conseguir una pulverización correcta; el número de Sature (NS) y, por consiguiente, la calidad de la pulverización, depende directamente de la viscosidad.

El carbón pulverizado y la finura de molienda.

La finura de molienda se valora haciendo pasar una muestra de carbón pulverizado por un tamiz de un determinado ancho de malla. El residuo retenido en el tamiz se denomina rechazo y se expresa en tanto por ciento del peso total de la muestra.

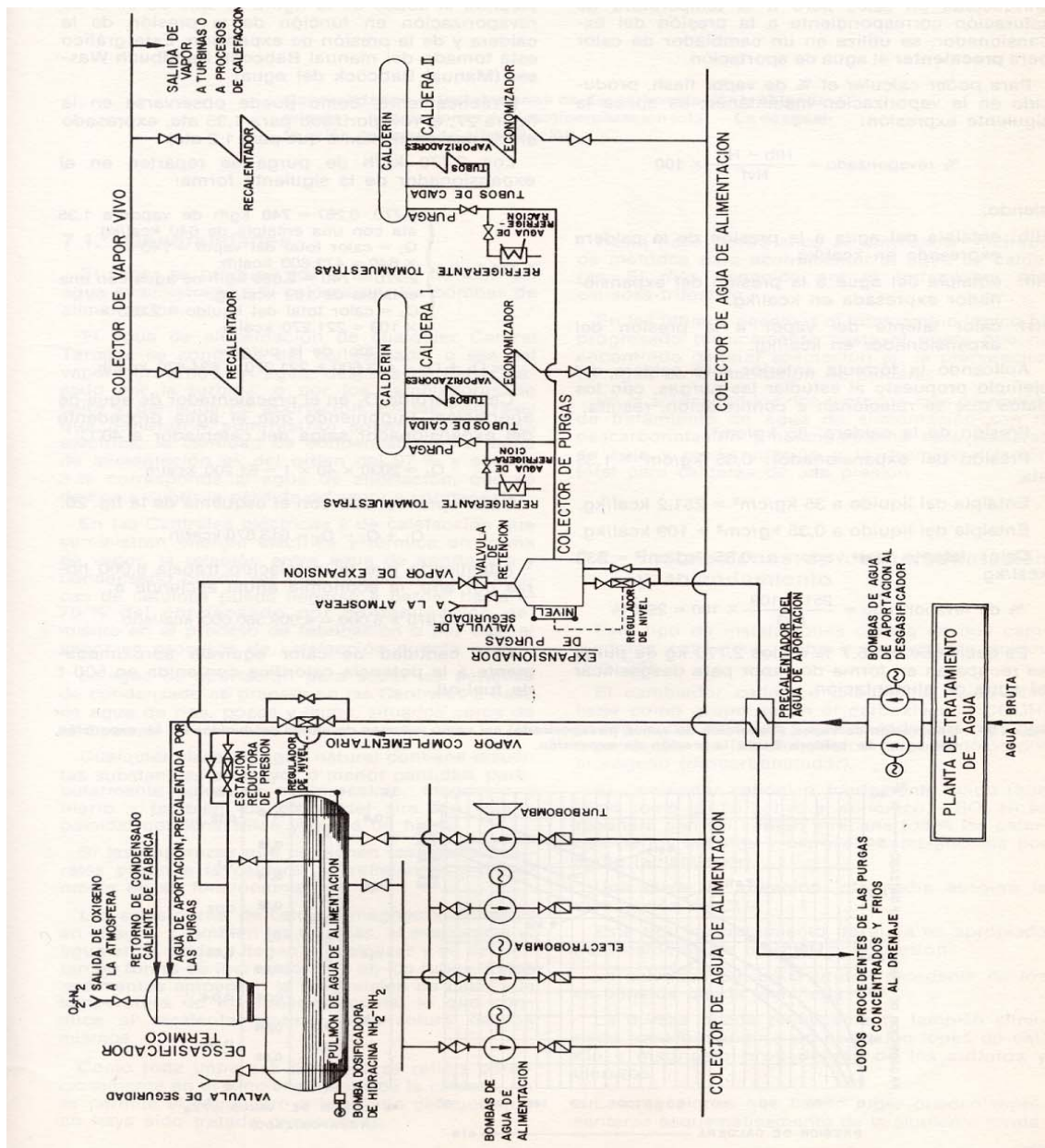
Es evidente que un exceso de finura consume mucha energía y provoca el rápido desgaste de los elementos de molienda de los molinos.

Un defecto de finura acarrea la aparición de inquemados.

La finura óptima es función del contenido en volátiles del carbón.

Para poder recuperar el calor de dichas purgas, se representa en la Figura 2 (Esquema de recuperación del calor sensible de las purgas de calderas) una instalación típica para aprovechar casi totalmente el calor sensible de las purgas.

Figura 2- Generación de Vapor.
Esquema de Recuperación de Calor Sensible de las Purgas de Calderas



El colector de purgas, que recoge la purga de todos los calderines de las calderas, conectados en paralelo, descarga en un Expansionado, que por efecto flash (vaporización instantánea) transforma parte de las purgas en vapor de baja presión; este vapor se aprovecha en el desgasificador térmico para eliminar casi totalmente el oxígeno del agua de alimentación (en un buen desgasificador se logra un contenido de O_2 residual de $20 \text{ mg/l} < > 0,020 \text{ mg/l}$), el vapor obtenido en el expansionador por vaporización instantánea es de todo similar al obtenido en la caldera, excepto de humedad y con un bajo contenido en sólidos.

El agua que sale del tanque de expansión, enriquecida en sales pero a la temperatura de saturación correspondiente a la presión del expansionador, se utiliza en un cambiador de calor para precalentar el agua de aportación.

eoi

eoi
Hornos.

eoi

Introducción

Es difícil definir de forma concreta la acepción de horno debido a la multiplicación de fines a que el mismo sirve. En unos casos se entenderá como “horno” la instalación donde se transforma la energía química de un combustible, o la energía eléctrica, en calor que se utiliza para aumentar la temperatura de aquellos materiales depositados en su interior y darles el estado necesario para su futuro tratamiento. Otras veces, la denominación “horno” define un dispositivo donde, mediante la aplicación de la energía térmica, se realizan una serie de transformaciones físico – químicas que varían la composición y estructura de la carga alimentada. En este caso, actúa como reactor a temperatura elevada y su concepción vendrá definida por la naturaleza de dichas transformaciones. En todos los casos la acepción de horno está íntimamente ligada al proceso que en él se realiza.

Los procesos que pueden tener lugar en la zona de trabajo de un horno son múltiples y pueden agruparse en los apartados siguientes:

- Transformación de energía química o eléctrica en calor.
- Intercambio de calor en las fases sólidas, líquida y gaseosa.
- Transformación físico- químicas de materiales o semifabricados.
- Movimientos de materiales sólidos, líquidos o gaseosos.

Generación de calor por combustión.

Los combustibles utilizados en los hornos abarcan toda la gama de los existentes. El empleo de uno u otro depende del proceso involucrado y del tipo de horno. El calor aportado a los hornos procede, en su mayor parte, de combustibles fósiles o energía eléctrica.

Existen procesos que suministran un alto porcentaje de las necesidades energéticas del horno, debido al calor de las reacciones que en él se producen, como ocurre en la conversión de hierro en acero por el procedimiento Bessemer, donde los combustibles pueden decirse que son silicio, carbón y fósforo. Hay otros combustibles como la madera y sus derivados, así como residuos vegetales, pero su utilización en el ámbito industrial es muy restringida.

La cantidad real de calor que se puede obtener por combustión de un determinado combustible, depende del poder calorífico efectivo del combustible en las condiciones particulares de la combustión, considerando las condiciones reales de la misma y la extensión de estas reacciones. Pero este factor, aunque de gran importancia, no es el único que debe valorarse en un estudio racional de aprovechamiento de calor en los hornos, siendo necesario contemplar otros factores como son: la temperatura de la llama, el calor útil y la calidad de la energía.

Temperaturas de Llama.

La temperatura que se puede alcanzar en una combustión depende no sólo del poder calorífico del combustible, sino de la forma de realizar dicha combustión. En términos generales, se pueden reducir los factores que influyen sobre la temperatura de la llama a los siguientes:

- 1- Poder calorífico efectivo del combustible, que depende de la temperatura real de operación, ya que ésta determina el equilibrio entre las diversas reacciones que se producen en la combustión.
- 2- El porcentaje de gas inerte, normalmente nitrógeno, que acompaña al oxígeno en la combustión. Al disminuir este porcentaje, usando aire enriquecido, disminuye el calor absorbido por los gases y, aunque el calor total producido no varía, la temperatura será más elevada.
- 3- La temperatura de los combustibles y comburentes al iniciarse la combustión. Su calor sensible se sumará al poder calorífico del combustible, elevando la temperatura de los gases.
- 4- La velocidad de la combustión, que si es instantánea liberará toda la energía en forma de calor, reduciéndose las pérdidas por radiación al ser absorbida rápidamente por los productos. Esta velocidad puede mejorarse mediante un diseño adecuado del quemador o incrementando la reactividad del combustible.

La temperatura de llama indica la máxima temperatura que puede conseguirse en el horno.

Calor Útil.

El utilizar en los hornos temperaturas altas de llama presenta una ventaja que se muestra claramente si se considera el concepto de calor útil. Este puede asimilarse al calor sensible cedido por un gas desde su temperatura t_2 hasta la temperatura final de la carga que calienta, t_1 . Cuanto mayor sea la temperatura del gas, mayor será el porcentaje de calorías, de las totales, que se utilizan en calentar la carga.

La temperatura de la llama aumenta al precalentar el comburente y al disminuir el volumen de gases, y que el calor útil disminuye al disminuir la temperatura de llama, para una temperatura determinada de la carga.

Calidad de la energía.

Thring define la calidad de una cantidad de energía como la parte de la misma que, en un sistema ideal perfecto, puede convertirse en trabajo.

Si se supone que una cantidad de energía Q está contenida en una masa de gases de combustión (que se encuentra a t_1 °K respecto a la carga del horno que está a t_0 °K), la calidad de su energía v_1 se calcula sobre la base de la eficacia de la máquina térmica según el ciclo de Carnot, sería:

$$V_1 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

Modernamente a V_1 se le llama exergía o energía utilizable o lo que es lo mismo, la máxima capacidad de trabajo que puede desarrollar un sistema cuando pasa de unas condiciones determinadas a otras tomadas como referencia y que en este caso sería la carga del horno a T_0 K.

Si esta cantidad de energía se utiliza en calentar la carga hasta la temperatura T_2 , la calidad de la energía contenida en los gases sería, ahora:

$$V_2 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right)$$

Con lo cual habría una pérdida de calidad

$$\delta V = Q \left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

Durante cualquier proceso de tratamiento la energía se presenta a diferentes temperaturas y la calidad de la misma sufre variaciones que hay que conocer.

La calidad de las energías eléctrica y mecánica será, de acuerdo con el primer principio de la termodinámica, igual a la cantidad de energía transformada. Es decir:

$$Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) = Q$$

Y ello indica que la temperatura efectiva de estas energías es infinita.

Utilización de Energía Eléctrica en Hornos

En la coyuntura energética actual, la electricidad, energía "secundaria" frecuentemente elaborada a partir de otras fuentes de energía, se encuentra en una situación particular. Se dice que el empleo de electricidad es, de hecho, una causa de derroche de energía primaria, ya que es conocido, por el principio de Carnot, que el rendimiento de las centrales térmicas viene limitado alrededor del 35% para las comparaciones de eficacia energética global se considera que para suministrar a una empresa, 1 kWh es necesario consumir en la central 2,5 termias (10,46 mj) de fuel-oil.

Desde este punto de vista parece lo más indicado sustituir la electricidad por combustibles fósiles; pero si se observa la realidad en un conjunto de operaciones industriales, se llega a la conclusión de que en muchos procesos eléctricos su sustitución por otras soluciones concurrentes, obliga a utilizar hasta cuatro termias por cada kWh anteriormente gastado. Este resultado, que a priori parece sorprendente, se explica al integrar todos los consumos, con sus rendimientos reales observados, en el conjunto de la cadena energética. La electricidad no tiene necesidad de un fluido portador y se puede transformar en calor, en el sitio donde éste es necesario de formas muy diversas, como:

- Efecto Joule.
- Inducción electromagnética.
- Rayos infrarrojos, ultravioleta, de alta e hiperfrecuencia.
- Arco eléctrico.
- Plasma.
- Fuerza motriz (bomba de calor)
- Bombardeo electrónico, etc.

Cada una de estas tecnologías posee propiedades características que pueden conducir a economías energéticas, y de aquí que siempre haya que considerar la utilización de este tipo de energía. Algunas de estas ventajas, son:

- La calefacción directa por efecto joule (calefacción por conducción, donde la corriente pasa por el cuerpo a calentar) disipa la energía directamente en el interior de la pieza, suprimiendo los problemas de transmisión de energía desde la fuente de calor al cuerpo a calentar.
- La calefacción indirecta por efecto joule es fácil de descentralizar y modular, permite un buen aislamiento térmico, se regula fácilmente y posee un rendimiento constante de conversión de la energía.
- La inducción calienta un cuerpo metálico directamente en su masa, bajo el efecto de las corrientes inducidas.
- Los infrarrojos transfieren la energía de la fuente a la carga a calentar, sin hacerlo con el medio que la contiene; concentra fuertes densidades de potencia y presenta una inercia térmica débil.

En la práctica industrial, los hornos eléctricos se pueden clasificar en cuatro tipos, según la forma de utilización de la energía eléctrica:

- Calefacción por resistencia.
- Calefacción por arco eléctrico.
- Calefacción por inducción.
- Calefacción dieléctrica.

Calefacción por resistencia.

El calor es producido por efecto joule; la corriente atraviesa un cuerpo en cuyos extremos existe una diferencia de potencial. Si el material es independiente del proceso la calefacción es indirecta. Si por el contrario forma parte integral del proceso, la calefacción es directa.

Hornos de calefacción indirecta.

La naturaleza de los materiales que constituyen las resistencias de calefacción esta fijada por la temperatura que se quiere alcanzar y las condiciones particulares de utilización.

Las aleaciones de níquel-cromo se utilizan hasta 1.100 °C en régimen permanente y en atmósfera de aire. Las de hierro-cromo-aluminio y las de hierro-cromo-aluminio-cobalto se usan hasta 1.350 °C. Son más frágiles y su montaje es más delicado no se deben utilizar con refractarios que contenga que contenga sílice.

El grafito es el material más refractario; se utiliza en forma de barillas, tubos y elementos granulares que permiten alcanzar los 3.000 °C bajo condiciones reductoras o en el vacío.

Los compuestos de carburo de silicio se utilizan bajo la forma de barillas. Da resultados satisfactorios hasta 1.600 °C, con el inconveniente de que el envejecimiento de la resistencia es muy rápido.

Existen numerosos hornos de cuba y hornos túneles que utilizan las resistencias eléctricas para su calefacción. Se puede citar como aplicaciones la fabricación de cianamida calcica, carburo de silicio, carburo de boro, y grafito a partir de coque de petróleo. Se utilizan también para operaciones de calentamiento y recocido, y su consumo especifica varia con la temperatura y el tiempo de utilización.

Hornos de calefacción directa.

En estos, la resistencia eléctrica es la sustancia a tratar. La corriente eléctrica, al atravesarla, eleva su temperatura hasta la deseada para su transformación. Evidentemente la primera condición necesaria, para este tipo de hornos, es que la sustancia sea conductora de la electricidad. Este género de instalaciones se utilizan en la industria del vidrio y la del carburo cálcico. Su mayor aplicación se encuentra en el calentamiento de grandes vigas, lingotes de metales féreos antes de su forjado, y en el recocido continuo de cables féreos y no féreos.

Los hornos por resistencia eléctrica tienen la desventaja de un consumo primario de energía superior a los de llama, aunque son más simples, no necesitan grandes equipos de regeneración y acumulación de calor, la transmisión de calor es completa, y poseen otras ventajas como son la facilidad de los ajustes, su ligereza y el ser fáciles de adaptar a una marcha automática.

Calefacción por arco eléctrico.

Su aplicación más difundida es la soldadura. Es una forma de calefacción por resistencia, compuesta por gases a alta temperatura (superior a 5.500°C), muy ionizados (plasma), que poseen electrones libres que convierten al gas en conductor, de tal forma que mantienen la citada temperatura por calentamiento óhmico. Las altas temperaturas obtenidas en los arcos permiten transferencias muy elevadas de calor (250 kW/cm²) y el uso de atmósferas controladas.

Se rodea la pieza con una bobina de inducción, alimentada con corriente alterna, que induce sobre ella un flujo magnético. Según la ley de Lenz, la f.e.m. inducida en la pieza tiene un sentido opuesto a la causa que la produce, siendo esta corriente la que, al pasar por la resistencia que tiene la pieza, genera calor.

La ventaja metalúrgica de la fusión por inducción es su rapidez, su limpieza y la posibilidad de utilizar atmósferas inertes o vacío. Se aplica, principalmente, a la fusión y purificación de aceros especiales aleaciones, así como para tratamientos térmicos y, en especial, endurecimientos de superficies.

Calefacción Dieléctrica.

Se puede aplicar solamente a cuerpos no conductores. En éstos las moléculas, sometidas a un campo eléctrico alternativo, son frenadas en su movimiento por fuerzas de frotamiento internas. Esta fricción absorbe energía que aparece bajo la forma de calor en la masa de la materia, elevando así su temperatura. La carga se sitúa entre los electrodos, formando el conjunto un condensador intercalado en el circuito.

La calefacción dieléctrica se manifiesta en toda la masa del cuerpo a calentar. De esta forma los cuerpos de mala conductividad térmica se calientan rápidamente y de forma homogénea, lo que no es posible con otro tipo de calefacción. El rendimiento de la instalación se aproxima a la unidad, porque toda la potencia se disipa en el seno de la carga sin ningún tipo de intermediarios.

Tipos de hornos.

La dificultad que existe para clasificar coherentemente los diversos tipos de hornos, se aprecia al observar la gran variedad de productos y medios de calefacción, la amplia gama de temperaturas y caudales y la existencia de gran número de aparatos, fruto de la experiencia de una industria particular, difíciles de englobar en un tipo general.

Cualquier criterio de clasificación lleva a gran número de grupos y subgrupos, existiendo solapamientos entre las divisiones, así como modelos sin posible clasificación. En esta exposición se consideran tres grandes tipos de hornos: de solera, de crisol y de cuba, y algunos casos especiales como los de lecho fluidizado, tubulares, convertidores y máquinas de sinterización. Aunque participan en los equipos anteriores también se recogen los hornos de tratamientos térmicos y los hornos de altas temperaturas. Las calderas de vapor no se incluyen por desarrollarse en otro capítulo.

Hornos de solera.

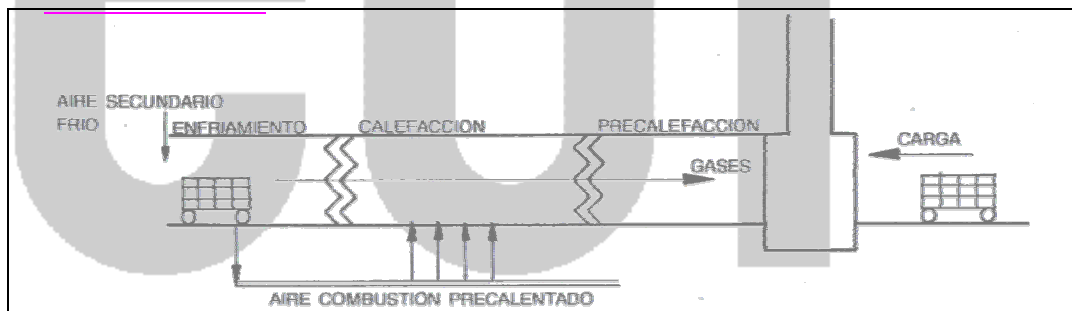
Son los que presentan mayor variedad; incluyen hornos fijos, basculantes y rotatorios. Su calentamiento se realiza con todo tipo de combustible.

En la mayoría de los casos, la carga se deposita en el hogar (solera) de la cámara del horno y se calienta por convección y radiación desde la fuente de calor situada encima de ella. Se utilizan en tostación, fusiones, recalentamientos, y otros muchos fines. Suelen llevar, frecuentemente, regeneradores para el precalentamiento del gas y el aire.

Dentro de este grupo de hornos de solera se pueden destacar los siguientes:

- Hornos de balsa: se utilizan, principalmente, para la fabricación del vidrio. Su descripción detallada se recoge posteriormente.
- Hornos de soleras múltiples: Son típicos en tostaciones de minerales que contienen azufre. Están constituidos, esquemáticamente, por varias soleras o pisos superpuestos. La carga se alimenta por la parte superior y el residuo se descarga por el fondo, transportándose de piso a piso mediante rasquetas. El flujo de mineral se realiza en contracorriente con el aire caliente, produciéndose de esta forma la reacción. Este tipo de hornos ha sido desplazado por los de lecho fluidizado.
- Hornos túnel: Se trata, general, de instalaciones de gran capacidad. El material se carga en plataformas deslizantes sobre las que atraviesan, en contracorriente, los gases de combustión, por lo que, termodinámicamente, son muy eficaces. El aire de combustión se precalienta al enfriar la carga saliente del horno y los gases residuales se utilizan para precalentar la carga. En la Figura 3 se representa, esquemáticamente, el funcionamiento de este tipo de hornos.

Figura 3.- Horno Túnel



Una forma especial de horno túnel es el horno de solera móvil, diseñado en forma circular, en el cual la carga recorre el horno sobre una cinta sin fin o una solera móvil. El rendimiento térmico es mejor que en el de túnel recto, pero el coste es más elevado y con mayor mano de obra.

- Horno rotatorio: Es de los más utilizados. Es un horno de tratamiento en continuo que encuentra aplicaciones en el dominio de los procesos de secado, calcinación y reacciones diversas, tales como reducción y sinterización.

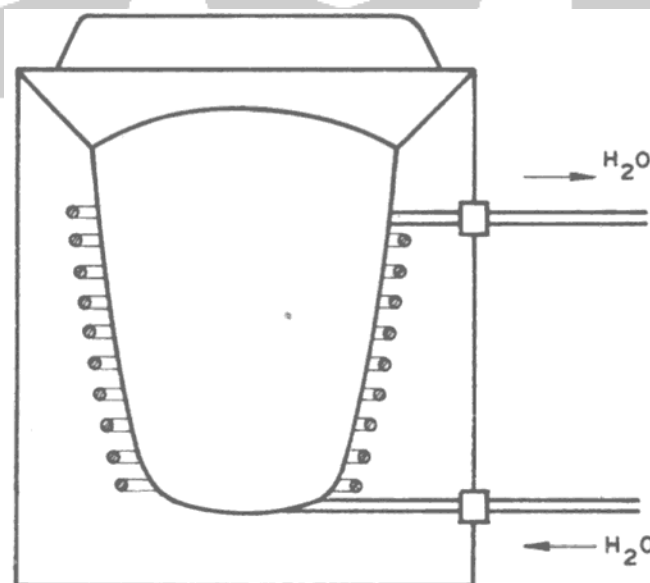
Están constituidos por cilindros metálicos de eje inclinado con rotación continua, en los cuales la carga y los gases de combustión se mueven en contracorriente. Las temperaturas de operación pueden variar entre un centenar de grados, para operaciones de secado, y unos 1.400°C para los hornos de cemento.

- Hornos eléctricos de solera: Se encuentran tres clases diferentes. En los primeros, trifásicos tipo Heroult, la corriente circular entre los tres electrodos a través de la carga conductora. Se utilizan, comúnmente, en la fabricación de aceros. El segundo tipo es monofásico saltando el arco entre dos electrodos de carbón, transmitiéndose la energía por radiación directa y por reflexión en el techo. El tercero, también monofásico, tiene la solera construida con material conductor de la electricidad y la corriente circular, a través de la carga, entre el electrodo y la solera.

Hornos de crisol.

Se utilizan en la industria metalúrgica para fundir metales. La carga se deposita en un recipiente en forma de crisol, que puede ser metálico o de material refractario, y que se calienta interna o externamente. La capacidad media es pequeña, siendo los mayores los basculantes que pueden alcanzar alrededor de las 20 toneladas de carga. En la actualidad se utilizan en hornos de fusión por inducción, con o sin núcleo, lo que permite la utilización de atmósferas controladas o con pequeño vacío. En la Figura 4 se representa, esquemáticamente, un horno de fusión por inducción sin núcleo.

Figura 4.- Horno de Fusión por Inducción, sin Núcleo



Hornos de cuba.

Están constituidos por torres cilíndricas o rectangulares. La carga se alimenta por la parte superior, descargándose los productos por la inferior. Normalmente el combustible (coque) va junto a la carga, y el conjunto se precalienta mientras desciende en contracorriente con los gases calientes ascendentes. El aire para la combustión se inyecta por toberas situadas encima del hogar o crisol. Estos hornos se utilizan para fusión, extracción, calcinación y tostación. El ejemplo más típico es el horno alto. En el mismo, la transmisión de calor se realiza por convección forzada dentro de la carga. En el vientre la temperatura es tan elevada que gran parte de la transmisión de calor se realiza por radiación entre las partículas de coque.

Los cubilotes y hornos tubulares verticales, son hornos de fusión para la fundición de hierro. Se les inyecta aire a baja presión y en la actualidad se suelen usar con inyección de aire caliente y de aire enriquecido en oxígeno, lo que facilita el control de la temperatura. Tienen baja eficacia térmica y son de uso intermitente. Los cubilotes de aire caliente tienen un buen rendimiento pudiendo llegar al 60-70% y consumiendo un 30% menos que los de aire frío.

Hornos de lecho fluidizado.

Su utilización es cada vez mayor en los campos del secado, tostación, descomposición y reacciones catalíticas heterogéneas. Son hornos continuos de gran capacidad que permiten un buen control de las temperaturas, incluso en reacciones exotérmicas, y un contacto perfecto entre gases y sólidos, siendo la transmisión de calor extremadamente rápida. La alimentación se realiza por encima de un lecho, sustentado en suspensión por una corriente de gases, pudiendo ser descargado el producto bien por arrastre total, si los tiempos de resistencia necesarios son cortos, bien por fondo o rebose si son mayores.

Hornos tubulares.

Son utilizados ampliamente en la industria del petróleo. Se caracterizan porque la carga circular a través del horno, dentro de tubos o haces de tubos que se calientan exteriormente con gases de combustión. Dentro de los mismos pueden realizarse varios procesos, tales como calentamiento sin vaporización, con vaporización total o parcial, o reacciones de tipo endo o exotérmico. El calentamiento se hace por radiación y convección, en una proporción que puede oscilar entre el 55 y 75 por ciento para el primero y del 45 al 25 por ciento para el segundo.

Hornos para tratamientos térmicos.

El tratamiento térmico suele ser el último proceso de fabricación y es el que da mayor valor añadiendo a la carga tratada. Para ello se somete a los metales a uno o varios ciclos de temperatura, lo que permite que adquieran las propiedades buscadas. Este tratamiento tiene que ser cuidadoso, requiriendo a veces atmósfera controladas y un manejo tal que impida que la carga sufra daños físicos, en especial cuando la misma está constituida por metales no férreos.

Los hornos utilizados para este fin son muy variados, utilizándose diferentes combustibles según la carga a tratar, forma de calentamiento y sistema de transporte de la carga. Como combustible pueden utilizar gas, aceite e incluso carbón, siendo la combustión, directa, en muflas o en tubos radiantes, y usar el sistema mecánico o de empuje para transportar la carga.

Hornos de altas temperaturas.

Existen diversas técnicas para obtener altas temperaturas, sin embargo, su utilización en los hornos viene restringida por aspectos tales como la adecuación de los materiales a estas temperaturas y el desarrollo, a escala industrial, de dichas técnicas. Las altas temperaturas en los hornos pueden conseguirse por combustión, utilización de plasma, calentamiento por radiación y haces electrónicos, concentración de radiaciones procedentes de fuentes de alta temperatura y cables explosivos, pero sólo las dos primeras técnicas se utilizan industrialmente, aplicándose el resto en estudios y laboratorio.

Convertidores.

Se utilizan en la fabricación de acero y la producción de cobre. El calor aportado al proceso se produce al reaccionar el aire que se inyecta por el fondo, o sobre la carga fundida, con parte de la misma. En el caso del acero se produce por oxidación del silicio, carbón, fósforo y manganeso y en el del cobre por oxidación del azufre y el hierro. La transmisión de calor es muy alta por producirse en el interior de la carga, pero las pérdidas de calor con los gases son muy elevadas.

Maquinas de sinterización.

Se utilizan para modificar las propiedades físicas de algunos minerales o mejorar su composición. La carga, junto al coque, se alimenta sobre una bandeja por cuya parte inferior se inyecta aire que quema al coque, produciendo monóxido de carbono que reacciona con el mineral caliente, reduciéndolo y que, al agotarse el coque, vuelve a oxidarse. La temperatura de trabajo está comprendida entre 1.200 y 1.300°C, y como combustible, además del propio coque, se utiliza el gas de horno alto y el de baterías.

Ahorro energético en hornos

En el desarrollo de los apartados anteriores se ha reseñado la necesidad de conseguir la máxima eficacia térmica, apuntando algunas técnicas encaminadas a mejorarla. El estudio de este ahorro energético debe realizarse siempre sobre el conjunto de elementos que acoplados al ahorro configuran el proceso, ya que sólo la correcta aplicación de su balance energético y la optimización del mismo mediante un estudio técnico económico, permitirá tomar las decisiones conducentes a mejorar el rendimiento energético de la instalación. En el caso concreto de los hornos se puede señalar, cualitativamente, una serie de ideas y premisas que pueden ser fuente de posibles mejoras y que deberán ser cuantificadas si quieren ser aplicadas a cada caso particular de horno y proceso. El conjunto de las mismas se recoge en los siguientes puntos:

Diseño y utilización del horno.

- La elección del tipo de horno, su capacidad, tipo de calefacción y forma de operar, debe siempre realizarse mediante un estudio técnico – económico, optimizando el diseño, incluso para unidades de pequeña capacidad, de tal forma que se tenga la seguridad de aplicar el más adecuado para el fin que se persigue.
- Debe procurarse que el horno se utilice exclusivamente para realizar sus operaciones intrínsecas.
- Siempre que sea posible debe pasarse del trabajo discontinuo al continuo.

- En los procesos discontinuos deben utilizarse hornos de baja inercia térmica (elección de aislantes adecuados) por alcanzar más rápidamente la temperatura de operación y tener menos pérdidas energéticas en las paradas. Así, por ejemplo, en un horno de resistencias, de funcionamiento intermitente, utilizando para el tratamiento térmico de metales, cuando se sustituye el refractario de briquetas sobrecomprimidas por fibras minerales se disminuyen su inercia térmica en la proporción de 180% a 1, consiguiendo un ahorro energético del 40%.
- Una buena estanquidad del horno evitará entradas de aire incontroladas, que traerían consigo una disminución de la temperatura, un exceso de oxígeno en los gases y un mayor volumen de gases salientes. Un aumento del 10% sobre el aire estequiométrico, originado por entradas falsas de aire en un horno de refinería, producirá una disminución en el rendimiento cercano al 6%.
- El empleo de materiales altamente refractarios permite temperaturas más altas de llama, con la consiguiente mejora de la eficacia.

Proceso.

- Debe trabajarse, siempre que sea posible, a plena capacidad de la instalación. Un horno túnel cerámica que trabaje al 50% de su capacidad nominal tiene un consumo específico superior, en un 25%, al conseguido a plena capacidad.
- En los hornos de funcionamiento intermitente debe programarse el trabajo de tal forma que los tiempos de espera sean mínimos. Reduciendo éstos a un 50%, se consigue, en un horno de fusión por inducción, una disminución del consumo específico de aproximadamente el 15%.
- Debe automatizarse al máximo el control del proceso, así como las operaciones de carga y descarga, evitando operaciones erróneas.
- Estudiar la posibilidad de cambiar el proceso, en sí mismo, por otro de menor consumo energético, por ejemplo el cambio de vía húmeda a semihúmeda en la fabricación de cemento.
- Aprovechar la energía desprendida en los procesos exotérmicos.
- No operar nunca a temperaturas más altas de lo necesario.

- Emplear aire enriquecido y precalentado para mejorar la cinética del proceso y el balance térmico. En un horno de refinería que queme fuelgas, con un 10% de exceso de aire, el precalentar el aire comburente hasta 240°C permite mejorar el rendimiento de la instalación en un 9%.

eoi

eoi



Concentración de Soluciones: Evaporadores.

eoí

Introducción

Se entiende por evaporación la operación básica que consiste en la separación de un disolvente volátil de un soluto no volátil por vaporización del primero, bajo condiciones tales que no se intenta separar los componentes del vapor producido.

En la práctica industrial en el 99% de los casos el disolvente es agua. El calor latente de vaporización es suministrado por la condensación de vapor de agua que se transmite desde el vapor a la solución a concentrar a través de superficies metálicas.

Los evaporadores operan totalmente a expensas de una transmisión calorífica, del orden de 560 kcal por kg de agua evaporada. Esta condición determina, más que ninguna otra, el tipo, tamaño, coste del evaporador y coste de la operación.

Dado el elevado consumo de energía en la evaporación, es de vital importancia su utilización eficaz.

Esto se traduce, por ejemplo, en la utilización del vapor desprendido en un efecto de evaporación para calentamiento de otro que opera a temperatura más baja; también en la comprensión del vapor desprendido de forma que pueda utilizarse como medio de calefacción en el mismo evaporador.

Otros requerimientos importantes de la evaporación aparte de los energéticos son, por ejemplo:

- La separación eficaz del vapor y del líquido residual.
- Conseguir las características especificadas para el líquido a evaporar o el producto.
- Otras características del producto como pueden ser su corrosividad, su degradación a elevada temperatura, formación de espumas o la necesidad de materiales especiales de construcción.

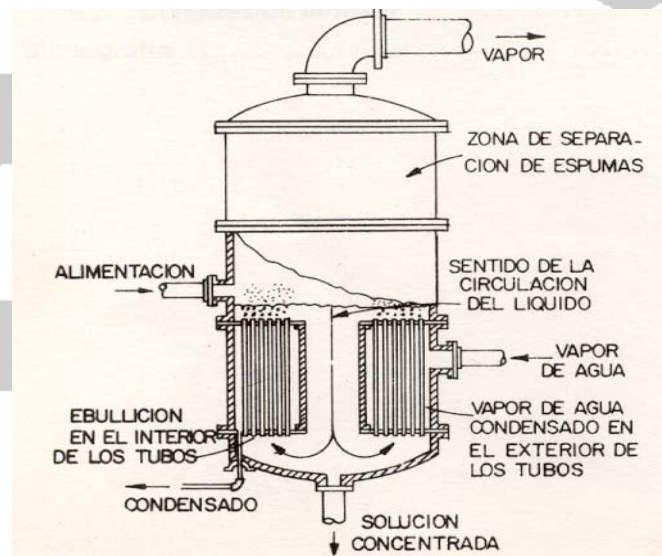
Tipos de Evaporadores

Un evaporador es la pieza principal del equipo en que se hierve un líquido. Dado el gran número de factores que intervienen en la transmisión de calor, y lo poco avanzado de los estudios sobre el fenómeno de la ebullición, se hace imposible el proyecto de un evaporador a partir sólo de consideraciones teóricas, reflejándose esta situación en la gran variedad de tipos de evaporadores. Entre éstos cabe considerar los siguientes tipos fundamentales:

Evaporador de tubos verticales.

Los evaporadores de tubos verticales están formados por un cuerpo cilíndrico y una caja de vapor sumergida en el líquido en la parte inferior del cilindro. Los tubos que atraviesan la caja constituyen la superficie de calefacción circulando el líquido por la parte interior. El líquido es impulsado hacia arriba por el vapor producido dentro de los tubos, y por convención natural cuando existe una elevada carga hidrostática que impide la ebullición. Para volver a entrar en los tubos el líquido desciende, o bien por un conducto central, o bien por una corona circular entre la cámara de vapor y el cuerpo del evaporador (Figura 5).

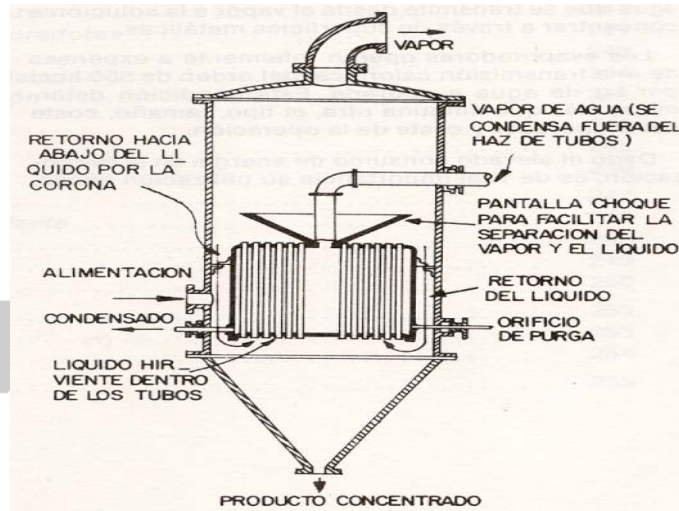
Figura 5.- Evaporador de Tubos Verticales con Circulación Natural



Evaporador tipo cesta.

Es similar al anterior pero tiene la cámara de vapor cerrada y el líquido desciende por una corona circular (Figura 6).

Figura 6.- Evaporador Tipo Cesta



Evaporador de circulación forzada de tubos verticales y tubos sumergidos.

En este tipo de evaporadores se utiliza una bomba para impulsar el líquido a través de los tubos. La mezcla vapor – líquido choca al salir de los tubos contra una pantalla que tiene una forma especial para provocar la coalescencia de las gotas pequeñas. El residuo líquido se recircula según se indica en la Figura 7. En la práctica corriente, los elementos de calefacción (tubos) más que formar un tubo vertical dentro del aparato (Figura 7) se tiende a que estén separados de él (Figura 8). De esta forma, si bien el tendido de tuberías es más complicado, resulta más fácil limpiar y sustituir tubos, sobre todo cuando son horizontales.

Figura 7.- Sección Vertical de un Evaporador de Tubos Verticales (Circulación Forzada)

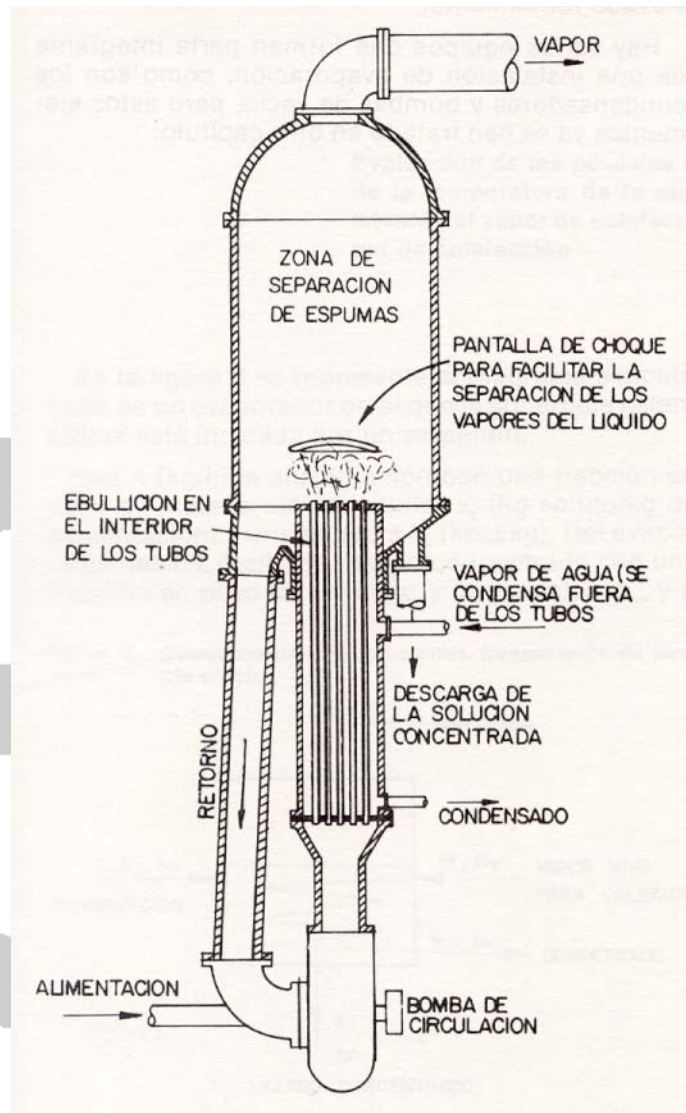
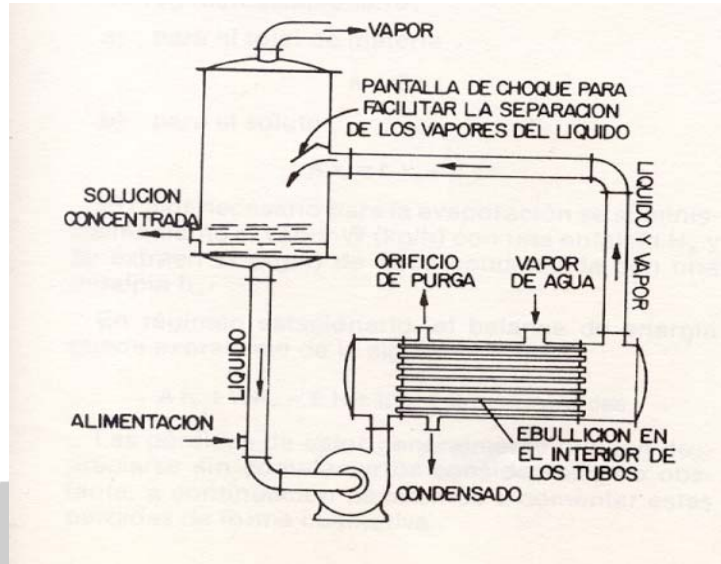


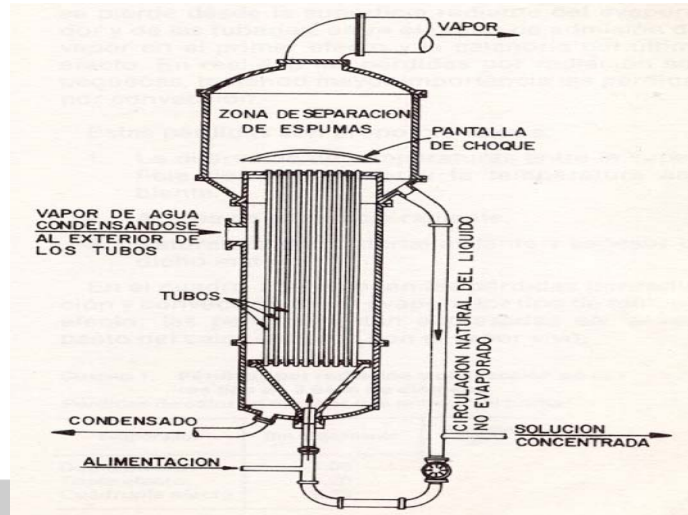
Figura 8.- Sección Vertical de un Evaporador de Tubos Largos Verticales



Evaporadores de tubos verticales largos.

La Figura 9 representa un evaporador de este tipo. El líquido se mueve en los tubos por convención natural y, como en los anteriores, tiene una pantalla de choque para facilitar la separación del vapor y del líquido. Este tipo de evaporadores no se emplean con líquidos que formen incrustaciones, en cambio está muy indicado con líquidos espumosos, debido a que la espuma se rompe contra la pantalla al salir de los tubos a gran velocidad. La operación puede ser con recirculación o de un solo paso; en este caso, el líquido concentrado se separa por la cabeza del evaporador. Los coeficientes de transmisión de calor son de instalación y funcionamiento de la bomba.

Figura 9.- Sección Vertical de un Evaporador de Tubos Largos Verticales



Para terminar esta breve descripción de los tipos de evaporadores más usuales, cabe indicar que la consecución de elevados coeficientes no es siempre la solución de todos los problemas, ya que esto sólo es cierto si el aumento de coste que imponen estos elevados coeficientes es inferior que el aumento por tamaño de los mismos.

Por otro lado, en muchos casos, elevados coeficientes en teoría no se han traducido en resultados prácticos. Así, por ejemplo, trazas de incrustaciones o un poco de gas incondensables tienen un efecto pequeño en un evaporador normal pero un efecto catastrófico en un diseñado para operar con un elevado rendimiento.

Hay varios equipos que forman parte integrante de una instalación de evaporación, como son los condensadores y bombas de vacío, pero estos elementos ya se han tratado en otro capítulo.

Balances de materia y energía en los evaporadores.

Evaluación de las pérdidas de calor en evaporadores.

Las pérdidas de calor en los evaporadores se pueden deber a las siguientes causas:

*** PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y CONVECCIÓN.**

Estas pérdidas comprenden la parte de calor que se pierde desde la superficie radiante del evaporador y de las tuberías, entre el punto de admisión del vapor en el primer efecto y la calandria del último efecto. En realidad las pérdidas por radiación son pequeñas, teniendo mayor importancia las pérdidas por convección.

Estas pérdidas son proporcionales a:

- 1- La diferencia de temperatura entre la superficie del evaporador y la temperatura ambiente.
- 2- Al área de superficie radiante.
- 3- Naturaleza del material aislante y espesor de dicho material.

*** PÉRDIDAS POR GASES INCONDENSABLES.**

Las pérdidas debidas a los gases incondensables resultan de una eliminación insuficiente de dichos gases o bien de un exceso de extracción. En el primer caso se reduce el coeficiente general de transmisión de calor; como consecuencia de esto, para que el evaporador dé el rendimiento previsto, éste debe tener un incremento en la caída de la temperatura durante la operación, es decir, una mayor presión en el primer efecto, cosa que no siempre se puede lograr y que en todo caso, conduce a un consumo mayor de vapor de los generadores.

En el segundo caso, si se eliminan los gases con demasiada generosidad, pueden arrastrarse vapores con los gases incondensables y pasar al condensador sin realizar ningún trabajo útil.

* **PÉRDIDAS POR PASO DE AIRE.**

El efecto del paso de aire es sobrecargar la bomba de vacío y hacer descender el vacío en el último efecto, reduciendo la caída total de temperatura en la operación, con las consecuencias citadas en el apartado anterior.

* **PÉRDIDAS CON LOS CONDENSADOS.**

Los condensados son una pérdida importante de calor si no se utiliza para otros servicios en la instalación.

Los condensados del primer efecto se usan generalmente para alimentar la caldera. Como este condensado está normalmente a una presión mayor que la atmosférica, se expande bruscamente en el tanque de alimentación de la caldera; esto determina una pérdida apreciable de calor. Esta expansión debe realizarse en un expansionador, y utilizar los revaporizados para la calefacción de otros efectos del evaporador (caso de ser de múltiple efecto).

La utilización del condensado de todos los demás efectos del evaporador debe estudiarse en cada caso particular, y despreciar estrictamente la menor cantidad posible.

* **PÉRDIDA CON EL AGUA DEL CONDENSADOR.**

El agua procedente de los condensadores barométricos suele eliminarse, o bien llevarse a un depósito donde se tiene que utilizar una cierta energía para enfriarla. Dicha agua transporta una cantidad apreciable de calor que se pierde por completo. La pérdida de calor es importante, pero desgraciadamente no se puede utilizar a causa de su elevada entropía.

De todas las pérdidas comentadas, la más importante en la práctica son las debidas a radiación y convección, pero estas pérdidas pueden reducirse con un buen aislamiento de forma que se puede llegar a considerarlas como despreciables.

Efecto de la temperatura de la alimentación.

Si la alimentación está fría y se introduce en el evaporador, debe calentarse por vapor de agua vivo hasta la temperatura de ebullición. Dado que la alimentación está muy diluida y, por tanto, en gran cantidad, el consumo de vapor de agua directo es muy elevado.

En el caso de que la alimentación sea extremadamente fría, será conveniente prever un cambiador exterior en el que se calienta hasta una temperatura próxima al punto de ebullición del líquido concentrado.

Efecto del recalentamiento del vapor de calefacción.

En los casos en que exista un recalentamiento elevado del vapor de calefacción, habrá una parte apreciable de la superficie de calentamiento que se mantiene seca. En esta parte el coeficiente de transmisión de calor entre el vapor y la pared metálica es el mismo que el de cualquier gas permanente, es decir, extremadamente bajo, posiblemente, la milésima parte del coeficiente de transmisión entre el vapor saturado y la pared metálica. Esto hará disminuir la capacidad de evaporación del evaporador.

Elección de la presión del vapor de calefacción.

La mayor parte de los evaporadores trabajan con vapor de baja presión entre 1,4 y 2,8 kg/cm², en ocasiones especiales, con presiones mayores.

Se explicará a continuación el porqué de trabajar a baja presión.

La razón de que se use el vapor en estas condiciones (24 kg/cm²) es que es mucho más valioso como fuente de trabajo que como fuente de calor.

La cuestión de si el vapor ha de expansionarse más o menos en la turbina es una cuestión económica que depende de la energía generada y del aumento del coste del equipo necesario. En la práctica normal resulta siempre más económico generar energía eléctrica y utilizar el vapor de escape de las turbinas en los evaporadores.

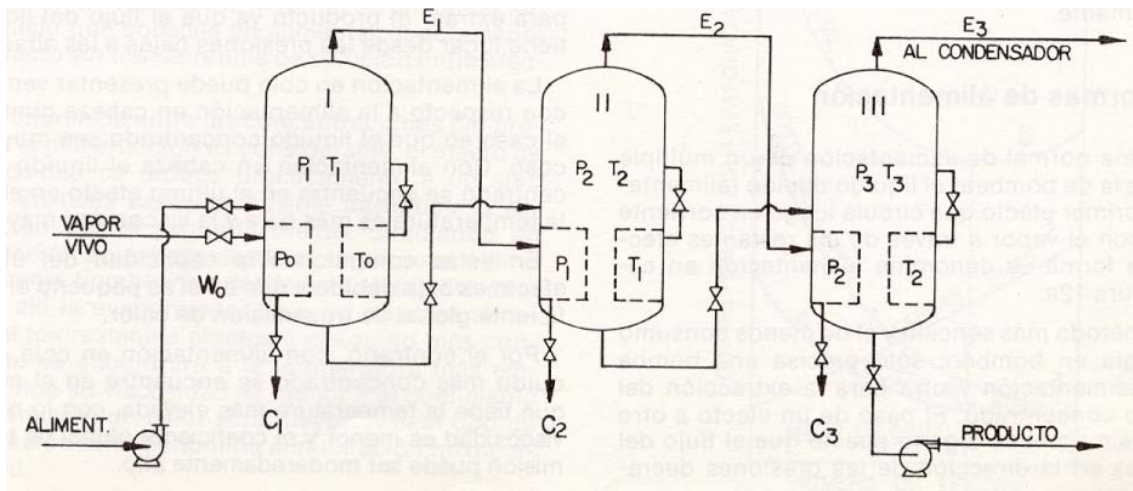
Esto no presenta otro inconveniente que el salto de temperatura vapor condensante- líquido en ebullición es bajo. Para mejorarlo se reduce la presión en el espacio de líquido a concentrar del evaporador con lo que la temperatura de ebullición disminuye; para conseguir esto hay que intercalar en el circuito de los vapores producidos un condensador y una bomba de vacío.

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 48 de 130

Evaporación en múltiple efecto. Fundamentos.

Un sistema de evaporación de múltiple efecto es simplemente una serie de evaporadores simples pero conectados de modo que el vapor desprendido en cada uno de ellos es, salvo el del último naturalmente, el agente de calefacción del siguiente. El paso del efecto simple al múltiple no altera en modo alguno las principales características constructivas del evaporador, sólo afecta a las tuberías de interconexión y al funcionamiento. La Figura 10 indica la forma de conectar tres evaporadores típicos de tubos verticales para formar un sistema evaporador de triple efecto.

Figura 10.- Evaporador de Triple Efecto



En el estudio de los evaporadores de múltiple efecto cada etapa se denomina cuerpo o efecto y se numeran siempre en la dirección del flujo del vapor.

Designando por a_1 la superficie de calefacción del efecto 1 y por u_1 el coeficiente global de transmisión de calor en dicho efecto, el calor transmitido por hora, será:

$$q_1 = A_1 * U_1 * \Delta t_1 \text{ (kcal/h)}$$

$$\Delta t_1 = t_0 - t_1$$

Si el calor necesario para calentar la alimentación, a_0 , hasta su temperatura de ebullición se desprecia por el momento, se deduce que, prácticamente todo el calor dado por el vapor vivo w_0 debe aparecer como calor latente en el vapor e_1 que sale del efecto 1. La temperatura del condensado que se evacua de la caja de vapor de efecto 11 debe ser muy próximo a la temperatura del vapor e_1 , por consiguiente, prácticamente todo el calor que se ha consumido en producir vapor en el efecto 1 debe aparecer cuando este vapor se condensa en el efecto 11.

EL calor transmitido en el segundo efecto vendrá dado por la ecuación:

$$q_2 = A_2 * U_2 * \Delta t_2 \quad (\text{kcal/h})$$

Pero q_1 y q_2 son prácticamente iguales

$$A_1 * U_1 * \Delta t_1 = A_2 * U_2 * \Delta t_2$$

Extendiendo el anterior razonamiento a otros efectos se tendrá:

$$A_1 * U_1 * \Delta t_1 = A_2 * U_2 * \Delta t_2 = A_3 * U_3 * \Delta t_3 = A_n * U_n * \Delta t_n$$

La expresión anterior es sólo aproximada y necesita corregirse por la adición de términos que, por lo general, son relativamente pequeños en comparación con las magnitudes que intervienen en la misma.

Por razones económicas, en la práctica todos los efectos son iguales con lo que la ecuación anterior se convierte en:

$$U_1 * \Delta t_1 = U_2 * \Delta t_2 = U_3 * \Delta t_3 = U_n * \Delta t_n$$

De esta ecuación se deduce que en un evaporador de múltiple efecto las caídas de temperaturas son aproximadamente inversas proporcionales a los coeficientes globales de transmisión de calor.

Las temperaturas t_1 y t_2 se obtienen como resultado de que el evaporador alcanza automáticamente su equilibrio (régimen estacionario). Puesto que t_0 y t_3 (para el caso de un triple efecto) están fijados, quedan determinados automáticamente Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 . El equilibrio descrito por las ecuaciones anteriores se mantienen automáticamente y no puede modificarse ni regularse excepto por variación de los valores de u_1 , u_2 y u_3 .

Economía de los evaporadores de múltiple efecto.

Puesto que el calor latente que queda libre cuando se condensa 1 kg de vapor a t_0 es aproximadamente el mismo que el necesario para evaporar 1 kg de agua a t_1 , el primer efecto de un evaporador de múltiple efecto evapora aproximadamente, 1kg de agua por cada kg de vapor vivo alimentado.

De acuerdo con el mismo razonamiento se deduce que por cada kg de vapor desprendido en el primer efecto y condensado en la cámara de vapor del segundo se evapora, aproximadamente, 1 kg de agua en este segundo efecto y así sucesivamente. Por tanto, en un evaporador de n efectos se evaporan aproximadamente n kg de agua por cada kg de vapor vivo suministrado, si bien, esta relación es sólo aproximada en el caso de que la alimentación llegue a su temperatura de ebullición correspondiente a la presión existente en el espacio de vapor del efecto en que se introduce.

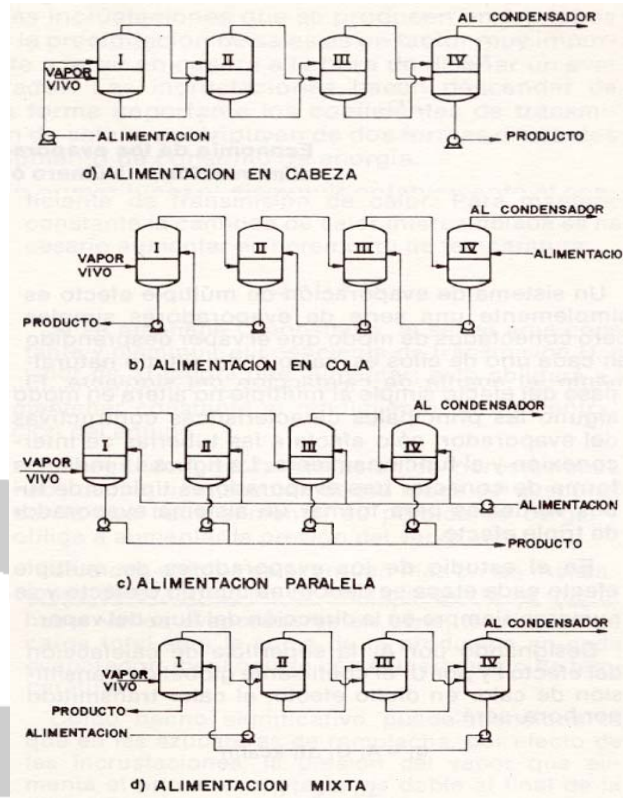
De lo anterior se deduce que la razón de trabajar con evaporadores de múltiple efecto es obtener una gran economía en el vapor de calentamiento.

La economía, en cuanto al consumo de vapor vivo, de un múltiple efecto no depende de las elevaciones de los puntos de ebullición, cumpliéndose, aproximadamente, que 1 kg de vapor condensado en el primer efecto genera aproximadamente 1 kg de vapor que se condensa en el segundo efecto y así sucesivamente.

Formas de Alimentación.

La forma normal de alimentación de un múltiple efecto es la bombear el líquido diluido (alimentación) al primer efecto que circula luego en corriente directa con el vapor a través de los restantes efectos. Esta forma se denomina alimentación en cabeza, Figura 11 a.

FIGURA 11.- Formas de Alimentar un Múltiple Efecto



Es el método más sencillo y el de menos consumo de energía en bombeo; sólo para la extracción del producto concentrado. El paso de un efecto a otro se hace sin bombeo alguno puesto que el flujo del líquido es en la dirección de las presiones decrecientes, necesitándose únicamente válvulas de regulación en las tuberías de conexión.

Otra forma corriente de alimentación es la alimentación en cola, Figura 11 b. En este caso la alimentación se introduce en el último efecto y luego se bombea entre efectos para su circulación en contracorriente con el vapor. Este método precisa de una bomba entre cada dos efectos además de otra para extraer el producto ya que el flujo del líquido tiene lugar desde las presiones bajas a las altas.

La alimentación en cola puede presentar ventajas con respecto a la alimentación en cabeza como en el caso en que el líquido concentrado sea muy viscoso. Con alimentación en cabeza el líquido concentrado se encuentra en el último efecto en el que la temperatura es más baja y la viscosidad mayor.

En estas condiciones la capacidad del último efecto es baja debido a que él es pequeño el coeficiente global de transmisión de calor.

Por el contrario, con alimentación en cola, el líquido más concentrado se encuentra en el efecto que tiene la temperatura más elevada, con lo que la viscosidad es menor y el coeficiente global de transmisión puede ser moderadamente alto.

Energéticamente, es mejor alimentar en cola, ya que, si la alimentación está fría y se introduce en el primer efecto (cabeza), debe calentarse con vapor vivo hasta la temperatura existente en dicho efecto. Puesto que la temperatura de este efecto es la más elevada del sistema y la alimentación llega diluida y, por tanto, en gran cantidad, el consumo de vapor es muy elevado. El vapor de agua así condensado no efectúa ninguna evaporación en el primer efecto ni, por tanto, en los restantes. Puesto que 1 kg de vapor vivo tiene una capacidad de evaporación potencial de n kg, siendo n el número de efectos, esta condensación representa una pérdida.

Si el vapor se alimenta en cola, la alimentación fría experimenta en el último efecto una elevación menor de la temperatura con el consiguiente ahorro en el consumo de vapor, del cual, cada kg ha evaporado ya $(n-1)$ kg.

Esto queda prácticamente compensado por el hecho de que conforme el líquido pasa de un efecto a otro es necesaria una aportación de calor sensible en cada efecto puesto que el líquido entra a una temperatura menor que la temperatura de ebullición existente en él. No obstante, el efecto neto es un ahorro en el consumo de vapor vivo si se utiliza la alimentación en cola con líquido frío.

Si la alimentación está caliente a la temperatura del primer efecto, la alimentación en cabeza exige un menor consumo de vapor ya que no hay que condensar vapor en este efecto para calentar la alimentación y la transferencia de la solución de un efecto al siguiente, a menor presión, se traduce en una cierta evaporación súbita con la consiguiente producción de vapor extra que, al menos en parte, efectúa evaporación en los otros efectos. Por otra parte si la alimentación caliente se introduce en el último efecto, conforme entra sufre una cierta evaporación súbita para alcanzar la temperatura de este efecto, pero este vapor va directamente al condensador sin realizar ninguna evaporación en los otros efectos.

En consecuencia, para una alimentación caliente la alimentación en cabeza es más ventajosa mientras que para una alimentación fría es mejor la alimentación en cola.

La Figura 11 c representa la forma de alimentación en paralelo que consiste en alimentar directamente cada efecto sin transferencia de solución entre efectos.

Si la diferencia entre las concentraciones del producto y la alimentación es considerable, el efecto de la viscosidad se reduce prácticamente a un solo efecto. En tales casos es posible introducir la alimentación por el segundo efecto, circulando en alimentación en cabeza desde el segundo al último y finalmente bombeando desde éste al primero para acabar allí la evaporación. Esto no afectará seriamente a los restantes efectos y el líquido más concentrado se encontrará a la temperatura más elevada donde su viscosidad es menor y el coeficiente de transmisión de calor será mayor. A este tipo de alimentación se le denomina alimentación mixta, Figura 11 d.

Número óptimo de efectos.

Esta cuestión la decide a menudo el salto de temperatura de que se dispone. Si la presión de vapor de calefacción es fija y si el grado de vacío es también fijo existe una cierta diferencia de temperaturas disponible que no puede alterarse al proyectar el sistema de evaporación. De esta diferencia hay que deducir la suma de todas las elevaciones del punto de ebullición. El salto útil de temperatura restante limita frecuentemente el número de efectos posible.

Un evaporador de circulación natural del tipo que sea tiene un salto mínimo de temperatura por debajo del cual no funcionará. Si el salto de temperatura es menor que este mínimo el desprendimiento de burbujas de vapor no es suficiente para iniciar la circulación del líquido y éste permanece parado con sólo una ligera ebullición en las capas superficiales. Esta diferencia mínima de temperatura varía según la disposición de las superficies de calefacción y la viscosidad del líquido y suele estar comprendida entre 5,5 y 11°C.

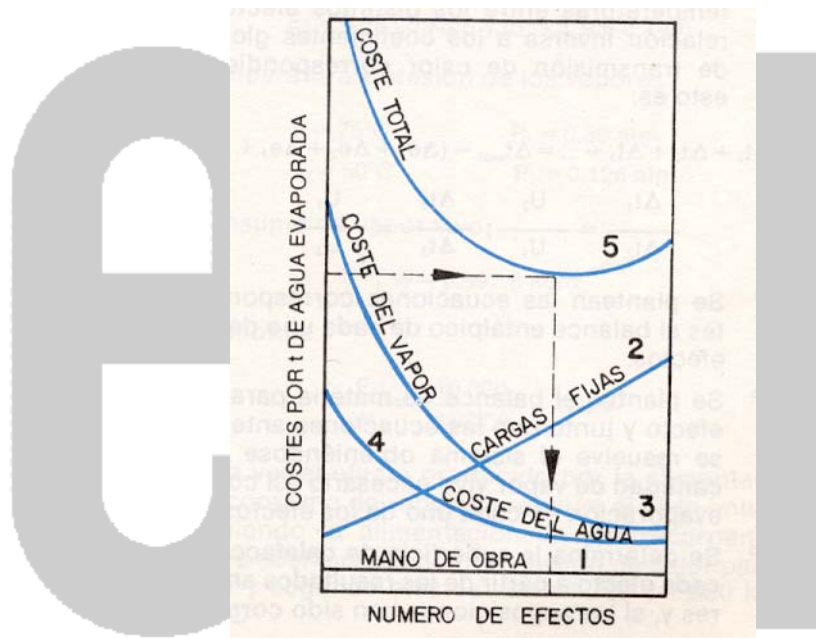
Por el contrario los evaporadores de circulación forzada no dependen de la convección y, por consiguiente, pueden funcionar con diferencias de temperaturas tan bajas como se deseen.

Admitiendo que haya una diferencia de temperatura suficiente, existirá un número de efectos que dará el coste mínimo por unidad de agua evaporada.

Puede suponerse que el coste de la mano de obra es constante cualquiera que sea el número de efectos. Los gastos de mantenimiento y amortización representan porcentajes definidos del inmovilizado, cualquiera que sea el número de efectos.

En la **Figura 12**, la curva 1 representa los costes constantes como la mano de obra. La curva 2 muestra las cargas fijas que no son exactamente proporcionales al número de efectos porque el inmovilizado, por metro cuadrado de superficie de calefacción, es mayor para un simple efecto que para un doble efecto y este inmovilizado sigue disminuyendo, aunque cada vez más lentamente, conforme aumenta el número de efectos; bien entendido que se trata siempre de aparatos del mismo tipo y tamaño. La curva 3 muestra el coste del vapor de calefacción que obedece a la ley económica de los rendimientos decrecientes y lo mismo sucede con la curva 4 que indica el coste del agua consumida.

Figura 12.- Coste de Operación y Número Óptimo de Efectos



El coste total por tonelada de agua evaporada es la suma de las curvas 1, 2, 3 y 4 representada por la curva 5. Esta suele indicar de ordinario, un coste mínimo bien concreto para una disposición determinada.

Es evidente que la Figura 12 tiene que basarse en todos los casos, en una misma forma de circulación del líquido. Para averiguar la forma óptima hay que repetir los cálculos de la Figura 12 para todas las demás formas de alimentación, comparándose luego los diversos mínimos así determinados para hallar la forma óptima y el número óptimo de efectos.

Compresión del Vapor

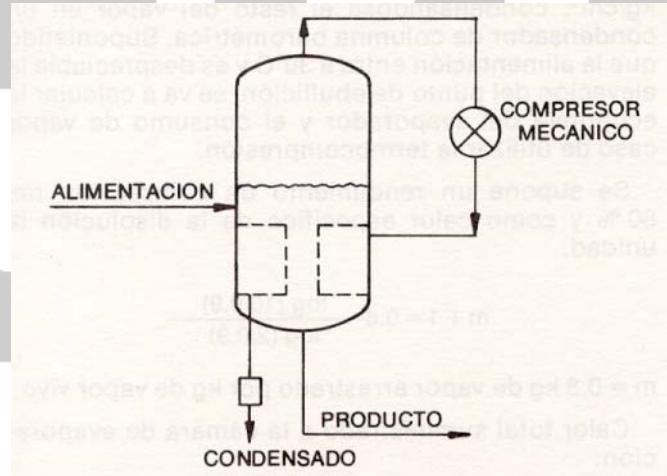
La compresión del vapor permite aprovechar el vapor procedente de la cámara de calefacción de la misma solución. Para ello es necesario aumentar la presión del vapor producido en la cámara con lo cual se aumenta también su temperatura.

Este procedimiento requiere la aplicación de energía mecánica o térmica sin necesidad de aumentar la superficie de calefacción.

Compresión Mecánica.

Este tipo de compresión se efectúa mediante compresores centrífugos ya que los de pistón no son adecuados por su baja capacidad y elevado coste. En la Figura 13 se representa esquemáticamente un sistema de evaporación con compresión mecánica.

Figura 13.- Reutilización del Vapor Producido por Compresión Mecánica



La compresión mecánica no resulta económica salvo en el caso de que se disponga de una cantidad de energía mecánica barata o se trate de soluciones que tengan un punto de ebullición parecido al del agua.

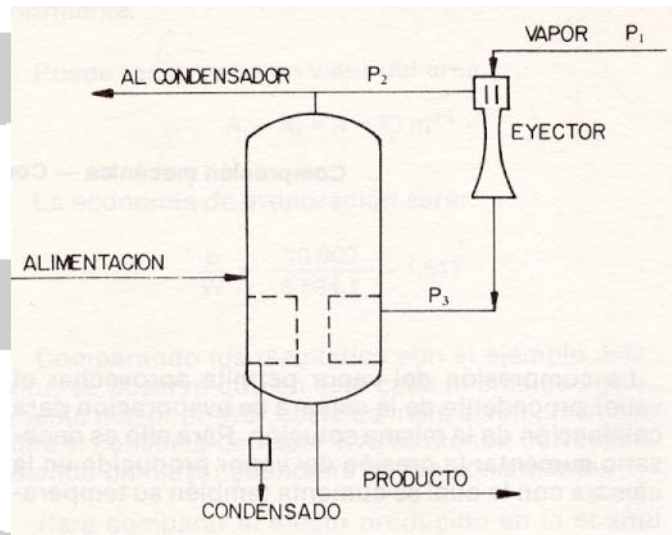
Compresión Térmica.

La compresión térmica permite el aprovechamiento del vapor procedente de la cámara de evaporación, a la presión p_2 , mezclándolo con el vapor vivo a presión elevada, p_1 , para dar un vapor de media presión, p_3 , que condensa a una temperatura suficientemente elevada en la cámara de condensación.

El aparato donde se efectúa la mezcla es un eyector como los empleados en la producción de vacío.

La Figura 14 es una representación esquemática de un evaporador con recompresión de vapor.

Figura 14.- Reutilización del Vapor Producido por Compresión Térmica



Los eyectores son aparatos relativamente baratos y de funcionamiento sencillo, resultando este procedimiento más económico que el de compresión mecánica.

En comparación con el evaporador de un solo efecto, la misma cantidad de vapor de alta proporciona una evaporación muy superior y así el rendimiento de vapor, definido por los kg de agua evaporada por kg de vapor de alta consumido, puede llegar a ser superior a 2.

La relación entre los caudales de vapor arrastrado y vapor vivo, m , puede calcularse aproximadamente mediante la ecuación

$$M + 1 = R \frac{\log\left(\frac{p1}{p2}\right)}{\log\left(\frac{p3}{p2}\right)}$$

Siendo R el rendimiento termodinámico de la compresión.

eoi

eoí

eoí

Motores Eléctricos.

eoi

Introducción

Los motores efectúan la transformación de la energía eléctrica recibida de la red en energía mecánica en su eje, por intercambio de las interacciones electromagnéticas y mecánicas entre los arrollamientos y los materiales magnéticos del rotor y el estator del motor.

En general el rendimiento de la transformación es muy alto comparativamente. Sin embargo, hay varias razones que inducen a prestar atención a la utilización racional de la energía en el empleo de los motores eléctricos:

- 1º El rendimiento de un motor eléctrico, que está ligado al empleo de una energía de calidad excepcional, debe matizarse contemplándole desde una perspectiva global para considerar el "alto coste exergético" exigido para la creación de la energía eléctrica que consume. Recuérdese que un rendimiento normal de un motor del 90% se refiere a la energía de consumo final directo.
- 2º La gran difusión del uso de los motores eléctricos, entre otras razones por su alto rendimiento, economía, facilidad de regulación, altos índices energía disponible / espacio y energía disponible / peso, comodidad de empleo y limpieza, da lugar a unas pérdidas absolutas de energía considerables, aun cuando a nivel de cada motor individual sean de poca entidad.

Como dato puede estimarse que el 35% de la energía eléctrica se consume en los motores eléctricos.
- 3º Las pérdidas de energía en los motores se transforman en calor reduciendo la duración de los mismos y obligando en casos determinados a unos regímenes de explotación alejados de lo que sería deseable, así como al empleo de refrigeración para la evacuación del calor.

En este capítulo se van a tratar los siguientes temas con un carácter general:

- Tipos de motores eléctricos.
- Pérdidas de energía en los motores eléctricos.
- Condiciones de aplicación de los diferentes tipos de motores eléctricos desde el punto de vista de la aplicación (máquina accionada) y del motor en sí mismo.

- Reducción del consumo de energía eléctrica por mejora del diseño del equipo accionado, del proceso en donde está incluido el motor eléctrico o de la explotación.

Dichos aspectos son:

- La generación de energía eléctrica debe efectuarse con el rendimiento más alto posible y cuando así lo permitan las circunstancias, utilizar esquemas de energía total integrándolos en el funcionamiento de la red del servicio público.
- Las redes transporte y distribución de energía eléctrica deben optimizarse teniendo presente los siguientes aspectos:

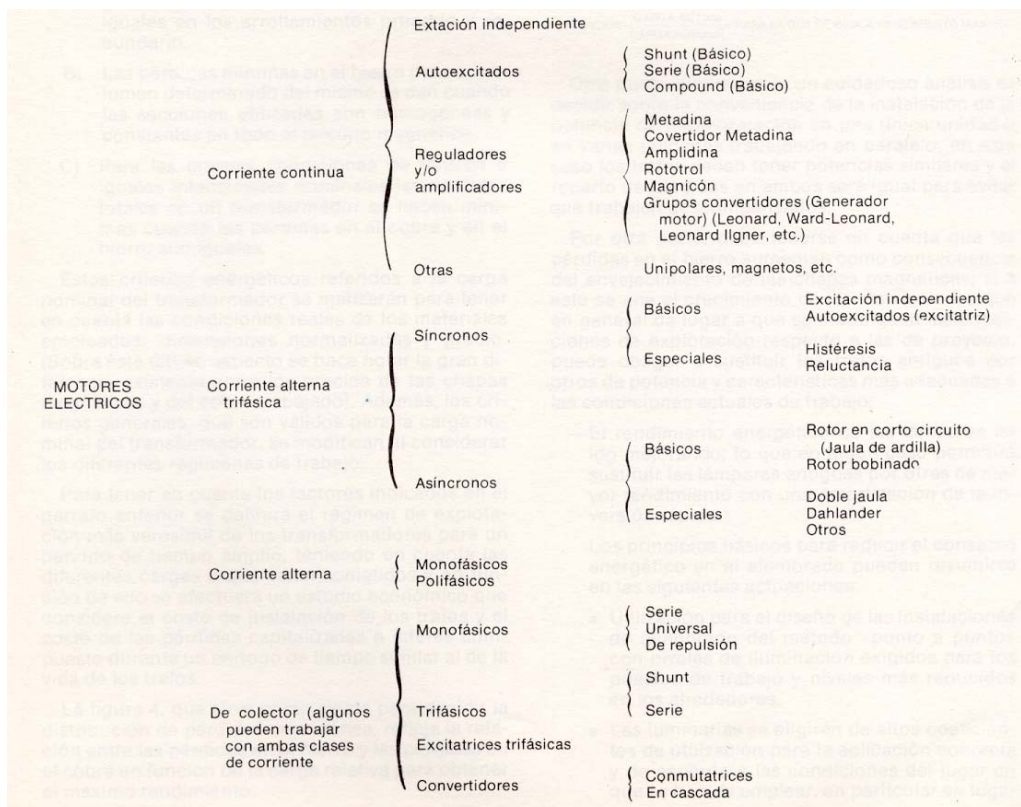
Proyecto: Elección de los niveles de las tensiones de distribución y optimización de las pérdidas: secciones de conductores, transposición de secciones, utilización de materiales superconductores, etc.

Explotación: Optimización del reparto de carga entre centrales y entre los grupos de una misma central.

Tipos de Motores.

La clasificación de los motores eléctricos por tipos, que se ha plasmado en el Cuadro 1, se ha efectuado de acuerdo con un criterio clásico, aunque externo al motor: la clase de tensión o corriente principal que le alimenta.

Cuadro 1.- Tipos de Motores Eléctricos



En los aparatos posteriores se tratarán preferentemente las máquinas básicas que se definen a continuación:

- Corriente continua: Conexiones Shunt, serie y compound.
- Corriente alterna trifásica: Síncronos y asíncronos de rotor en corto circuito(más conocido como jaula de ardilla) y de rotor bobinado.

Los motores básicos de corriente continua constan de un estator, fijo, que aloja las piezas polares en número par, alrededor de las cuales se insertan los devanados de excitación, que tienen la misión de crear un campo constante (instantáneamente, aunque modificable por variación de la corriente de excitación) y de un rotor, giratorio, que aloja en unas ranuras los devanados rotóricos a los que se alimenta de corriente a través del sistema de conmutación, colector–escobillas.

Los motores síncronos constan de un estator, fijo, que aloja los devanados trifásicos los cuales, alimentados por un sistema de tensiones trifásico, crean un campo que gira a la velocidad de sincronismo y de un rotor, giratorio (a la velocidad de sincronismo), en donde se aloja el devanado de excitación al que se introduce corriente continua por medio de un sistema de anillos rozantes y escobillas.

Los motores asíncronos básicos constan de un estator alrededor del cual se forman los devanados trifásicos que, alimentados por un sistema de tensiones trifásico, crean un campo que gira a la velocidad de sincronismo y de un rotor, giratorio (que gira a una velocidad dependiente de la carga, definida por el deslizamiento o separación respecto la velocidad de sincronismo), que puede concebirse de dos maneras:

- *Como rotor en corto circuito constituido por una serie de barras por las que circulan las corrientes inducidas (al cortar las barras el campo giratorio y por variación del propio campo) dispuestas en forma de jaula de ardilla.
- *Como rotor bobinado que contiene unos devanados trifásicos, cuyos extremos se conectan, a través de un sistema de anillos rozantes escobillas en corto circuito durante el trabajo normal del motor y al sistema de regulación durante la puesta en marcha.

La gran diversidad de tipos de motores eléctricos, está justificada principalmente en función de tres condicionantes: el desarrollo histórico de la ciencia y la tecnología de la electrotecnia y la electrónica, razones económicas y finalmente la diversidad de las exigencias requeridas a los motores eléctricos, tanto a nivel de potencia como a la diferente complejidad de las aplicaciones.

Los desarrollos iniciales se centraron en los motores de corriente de excitación independiente debido a que no se conocía el principio de autoexcitación y a que la energía disponible procedía de elementos galvánicos. A partir del descubrimiento de la autoexcitación, se extendió el uso de motores autoexcitados de corriente continua Shunt, serie y Compound que consumían energía eléctrica tomada de redes de corriente continua de poca extensión, complejidad y potencia.

Como consecuencia del desarrollo de las aplicaciones de la energía eléctrica para diversos usos, se hizo necesario general y transportar por medio de redes de creciente longitud, potencia y complejidad, cantidades importantes de energía eléctrica. Se vio que era difícil conseguirlo con las tensiones "naturales" empleadas en corriente continua, por lo que se adoptó una solución técnica y económicamente más viable que consistía en el empleo de redes de alta tensión, para lo cual se hacía necesario el desarrollo de sistemas trifásicos, utilizando medios estáticos de alto rendimiento para elevar las tensiones (los transformadores). Si a esto se une la circunstancia de que los motores asíncronos, particularmente los de jaula de ardilla, son más económicos, se explica que desde hace tiempo se utilicen preferentemente motores de alterna, aun cuando sus características velocidad – carga sean más desfavorables que las de los motores de corriente continua.

Se han propuesto y empleado varias soluciones para combinar las ventajas técnicas y económicas que conllevan la utilización de altas tensiones trifásicas en el transporte, con las mejores características de regulación de los motores de corriente continua. Entre estas soluciones se citarán las siguientes:

- *Empleo de motores trifásicos de colector que tienen unas características muy similares a las de los motores de corriente continua, para dos fines diferentes: motores de colector de alta potencia con campos de regulación de velocidad muy amplios y motores de reducida potencia acoplados a otro asíncrono regulado por aquel.
- *Empleo de grupos convertidores tipo Ward Leonard o similar en los que la energía, que se toma de una red trifásica, acciona un motor asíncrono que mueve el generador del grupo y la excitatriz.
- *Empleo de sistemas de rectificación de la corriente alterna tomada de la red en corriente continua mediante el empleo de rectificadores estáticos de vapor de mercurio o de silicio.

Pérdidas de energía y rendimiento en los motores eléctricos.

En la introducción se ha descrito muy resumidamente los diferentes tipos de pérdidas que se producen en las instalaciones eléctricas; en este apartado se amplía el tratamiento para el caso concreto de los motores eléctricos.

Las pérdidas de energía propias en los motores eléctricos, es decir, la diferencia existente entre la energía eléctrica tomada de la red y la energía mecánica obtenida en el eje del motor, se dividen en dos grupos: la pérdidas fundamentales y las pérdidas adicionales.

Las pérdidas resultantes de la aplicación del motor corresponde a la suma de las pérdidas propias del motor más las debidas al acoplamiento de la máquina conducida y a las condiciones de explotación de la máquina (pérdidas mecánicas en los órganos de los equipos de transmisión, energía consumida en frenados y aceleraciones de la máquina arrastrada, etcétera).

Pérdidas Fundamentales.

Estas pérdidas se originan como consecuencias de los procesos electromagnéticos y mecánicos fundamentales que ocurren en el motor y están constituidas por las pérdidas mecánicas, las pérdidas en el hierro, las pérdidas en el cobre y finalmente las pérdidas en la capa de contacto de las escobillas con los colectores o anillos rozantes, que aparecen en los motores que están dotados de estos elementos.

Pérdidas Mecánicas.

Las pérdidas mecánicas incluyen las correspondientes al rozamiento en los cojinetes (p_E), las de ventilación (p_V) y las de rozamiento de escobillas (p_R).

En el Cuadro 2 pueden consultarse las fórmulas que dan los valores de los diferentes tipos de pérdidas mecánicas para diferentes configuraciones de máquinas.

Cuadro 2.- Pérdidas Mecánicas

Tipo de pérdidas	Valor (vatios)	Condiciones	Notas	Nomenclatura	
P_E	En cojinetes de contacto plano	$26 \cdot d \cdot l \cdot v^{1.5}$ $21,5 \cdot d \cdot l \cdot v$ $19,6 \cdot d \cdot l \cdot v$	$v < 4$ $4 \leq v \leq 10$ $v > 10$	Utilizados en potencias medias y altas	d = diámetro muñón (cm) l = longitud muñón (m) v = velocidad muñón (m/s)
	En cojinetes de contacto rodante	$0,021 \cdot f \cdot v \cdot d^{-1}$	—	Utilizados en potencias medias y bajas	f = carga sobre anillo guía (Newton) d = diámetro centro hilas o eje de rodillos (cm)
P_V	En ventilación (ventilador en el propio motor)	$1,1 \cdot q \cdot v^2$	—	—	q = caudal (m ³ /s) v = velocidad exterior ventilador (m/s) h = sobrepresión (mm · H ₂ O)
	En ventilación (ventilador independiente)	$9,81 \cdot h \cdot q \cdot \eta^{-1}$	—	Función del ventilador exterior utilizado	η = rendimiento ventilador (%) μ = coeficiente rozamiento escobillas f_c = presión específica escobilla (Newton/cm ²)
P_R	En rozamiento de escobillas	$\mu \cdot f_c \cdot S_c \cdot V_c$	$0,15 \leq f_1 \leq 0,3$ $1,5 \leq f_1 \leq 5$	Sólo en motores de colector y anillos	S_c = superficie contacto total escobillas con el colector o anillos (cm ²) V_c = velocidad periférica colector (m/s)

La pérdidas mecánicas totales (p_M) están dadas por la fórmula:

$$p_M = p_E + p_V + p_R$$

Pérdidas en el Hierro (p_H).

Las pérdidas en el hierro se originan por dos causas:

- *Por la histéresis producida en los materiales magnéticos sometidos a remagnetización (temporal o espacial) bien sea por variación del flujo o por rotación en un campo variable.
- *Por la aparición en el seno de la masa de acero de f.e.m.s. que dan origen a unas corrientes, denominadas de Foucault.

Las pérdidas totales en el hierro (p_H) serán la suma de $p_{his} + p_f$. Existen unas fórmulas teóricas para el cálculo de estas pérdidas, pero los valores que dan son inferiores a los reales porque existen un conjunto de factores tecnológicos y de fabricación, no tenidos en cuenta. Un análisis somero revela que las pérdidas teóricas por histéresis se incrementa por la deformación en frío de las chapas magnéticas (orientación de los granos) como consecuencia de los procesos de estampado y recorte de las chapas y que las pérdidas teóricas por corrientes de Foucault se incrementan por la formación de rebabas durante el montaje de los paquetes de chapas o por deterioro del aislamiento de las chapas o por deterioro del aislamiento de las chapas durante el enmangado de los conjuntos a causa de una presión excesivamente alta, que da lugar a corto circuitos entre los paquetes de chapas.

El incremento de estas pérdidas puede controlarse y mantenerse en unos límites reducidos mediante un adecuado saneamiento de las rebabas, recocido de las chapas después del estampado en hornos de atmósfera de hidrógeno, control exacto de la presión de enmangado.

Pérdidas en el Cobre (p_c)

Las pérdidas en el cobre se descomponen en los siguientes conceptos:

*Pérdidas en el circuito del inducido (p_i) (normalmente rotor)

Estas pérdidas están originadas por el paso de las corrientes por los devanados del inducido y por los elementos conectados en serie con el devanado del inducido (polos auxiliares, devanado de compensación, etc.).

El cálculo de estas pérdidas se realiza después de conocer la configuración de los devanados.

Pérdidas de excitación (p_{exc}) (estator de motores de corriente continua y rotor de motores síncronos).

Vienen determinados por la siguiente fórmula:

$$P_{exc} = U_{exc} * L_{exc} \quad (\text{vatios})$$

en dónde:

U_{exc} = Tensión en bornas del circuito de excitación (voltios)

L_{exc} = Intensidad en el circuito de excitación (amperios).

*Pérdidas en el contacto de escobillas (p_{exc})

En los motores dotados de estos elementos, se produce una pérdida de energía en la zona de contacto de escobillas, que se calculará mediante la fórmula:

$$P_{exc} = \Delta U_e * L_a \quad (\text{vatios})$$

en dónde:

ΔU_e = Caída de tensión de transmisión por un par de escobillas de distinta polaridad (voltios).

L_a = Intensidad del inducido (amperios).

Pérdidas en el devanado estático.

En los motores asíncronos, en lugar de las pérdidas por excitación deben considerarse las pérdidas originadas por la circulación de corrientes en los devanados estáticos (efecto Joule).

Para el cálculo de estas pérdidas debe considerarse la configuración de los devanados.

Pérdidas Adicionales.

Las pérdidas adicionales se producen como consecuencias de los procesos electromagnéticos secundarios de carácter no deseado pero inevitable; afectan tanto al cobre como al hierro y se manifiestan como: a) corrientes parásitas debidas a los campos de dispersión en los arrollamientos y en las piezas metálicas macizas, b) pérdidas superficiales en el hierro, c) pérdidas pulsantes en los dientes, etc.

Estas pérdidas pueden dividirse en dos tipos: las constantes o de vacío y las que dependen de la carga de la máquina.

Pérdidas adicionales en los motores de corriente continua.

MARCHA EN VACÍO.

El origen de las pérdidas adicionales en vacío es el siguiente:

- Aparición de f.e.m.s. pulsantes originadas por la pulsación longitudinal del flujo como consecuencia de la variación de la reluctancia del entrehierro (bajo la zapatas polar aparecen temporalmente diferente número de dientes). Para disminuir la pulsación longitudinal del flujo y correspondientemente de la f.e.m. del inducido, es conveniente tomar el número de ranuras por un par de polos impar, puesto que en este caso la variación de la reluctancia debajo de un polo se compensa notoriamente por la variación de esta resistencia debajo del otro polo.
- Aparición de oscilaciones transversales del flujo magnético como consecuencias de la variación de las posiciones relativas del eje del flujo y el eje de la pieza polar, dando lugar a la aparición de f.e.m.s. que oscilan transversalmente. Para debilitar estas pulsaciones se recomienda achaflanar las ranuras del inducido en un paso dental por el eje de la zapata polar, o bien sesgar los bordes de la zapata polar en el caso en que los dientes del inducido sean rectos.
- Aparición de corrientes parásitas en el devanado de inducido como consecuencia de la irregular distribución del campo magnético fundamental en la ranura.

Estas pérdidas también aparecen cuando el motor está cargado y su valor no varía prácticamente con la carga.

MARCHA EN CARGA.

Además de las pérdidas reseñadas en el apartado anterior, también presentes en este caso, debe considerarse otro grupo de pérdidas adicionales que se desglosan a continuación:

- Aparición en el núcleo del inducido de f.e.m.s. como consecuencia de la distorsión del campo fundamentalmente por la reacción de inducido (máquinas sin arrollamiento compensador).

- Aparición de una distribución irregular de la densidad de corriente en la sección del conductor, cuya irregularidad aumenta con el número de conductores colocado en la altura de la ranura, con el aumento de la altura del conductor y con la frecuencia de remagnetización. Estas de dispersión concatenado con la sección flujo mutada.
- Aparición de pérdidas adicionales en el contacto de las escobillas por la irregular distribución de la densidad de corriente bajo la escobilla (conmutación rectilínea).
- Aparición de pérdidas adicionales en las conexiones igualadoras de las máquinas dotadas de ellas.

El cálculo y medición de las pérdidas adicionales, es difícil de realizar. Se pueden tomar los siguientes valores:

- *Para máquinas de c.c. sin arrollamiento compensador: 1% de la potencia suministrada.
- *Para máquinas compensadas: 0,5% de la potencia suministrada.

Pérdidas adicionales en los motores síncronos.

Estas pérdidas aparecen en vacío y en carga y se las conoce respectivamente como pérdidas en vacío y en corto circuito. Dichas pérdidas están provocadas por:

- *Los flujos de dispersión del estator.
- *Los armónicos superiores de la fuerza magnetomotriz de estator y rotor.
- *Por los dientes del estator y rotor.

La principal influencia son los flujos de dispersión del estator que crean pérdidas adicionales en las partes frontal y de ranura de devanado del estator y en todas aquellas partes donde penetra el flujo de dispersión: Pantallas, placas de presión, bandejas, etcétera.

Los armónicos superiores de la fuerza magnetomotriz crean pérdidas adicionales en las superficies del estator y rotor. Se las conoce como pérdidas superficiales.

Los armónicos del campo magnético debidos a las posiciones relativas de los dientes, originan pérdidas superficiales en el rotor y el estator (oscilación transversal del flujo) y pérdidas de pulsación (oscilación longitudinal del flujo en el diente).

Los medios empleados para reducir las pérdidas adicionales son las siguientes:

- División de los hilos conductores del devanado del estator, por la altura de la ranura, en varios hilos conductores.
- Transposición de hilos en la parte activa y en la parte frontal.
- Montaje del devanado con reducción de paso.
- Placas de presión, bandejas, etc., fabricadas de acero amagnético.

Pérdidas adicionales en los motores asíncronos.

Las pérdidas adicionales en los motores asíncronos, que reciben un tratamiento distinto dada su especial naturaleza, pueden diferenciarse en dos tipos: Pérdidas adicionales en el cobre y Pérdidas adicionales en el hierro.

- Las pérdidas adicionales en el cobre tienen dos orígenes:
 - a) Pérdidas adicionales en el cobre debidas a los armónicos superiores de la fuerza magnetomotriz.

Estas pérdidas tienen más importancia en los motores de jaula de ardilla y son debidas a la aparición de corrientes inducidas de frecuencia distinta a la de deslizamiento, que depende de la velocidad del motor.

- b) Pérdidas adicionales en el cobre debidas al efecto de desplazamiento de corriente.

Este fenómeno se da tanto en el rotor como en el estator, y se utiliza para mejorar las características de puesta en marcha de los motores de jaula de ardilla.

Las pérdidas adicionales en el cobre varían con el cuadrado de la intensidad que circula en el motor.

- Las pérdidas adicionales en el hierro se descomponen en:
 - a) Pérdidas debidas a la pulsación longitudinal del flujo magnético por variación de la permanencia, condicionada por la variación continua de la posición mutua de los dientes del rotor y el estator.
 - b) Pérdidas superficiales que se producen a causa de la irregularidad de la distribución de la inducción en el entrehierro originada por las ranuras.

Las pérdidas adicionales en el hierro varían proporcionalmente al cuadro de la tensión aplicada.

Para disminuir estas pérdidas se practica:

- a) El acortamiento del paso del devanado del estator, que conduce a la disminución de los armónicos superiores de f.m.m.
- b) El biselado de las ranuras del rotor respecto de las ranuras del estator, que desempeña el mismo papel que el acortamiento.
- c) La elección adecuada de los números de ranuras en el estator y en el rotor.

En este apartado no puede dejarse de mencionar que estas pérdidas adicionales están íntimamente ligadas con los denominados momentos parásitos de los motores asíncronos.

1. Momentos asíncronos creados por los armónicos superiores de la fuerza magnetomotriz, incluyendo los armónicos de los dientes.
2. Momentos síncronos que aparecen a determinada velocidad y con relaciones determinadas entre los números de ranuras del rotor y estator.
3. Momentos de vibración que aparecen con determinadas relaciones entre los números de ranuras de rotor y estator.

Estos momentos desestabilizan el funcionamiento del motor y para combatirlos se toman una serie de medidas que por vía indirecta reducen las pérdidas adicionales.

Procedimientos de reducción de los momentos asíncronos.

- Amortiguador los armónicos de la f.m.m. del devanado del estator empleando devanados de paso reducido y con número entero de ranuras por polo y fase.
- Achaflanado de ranuras del rotor o del estator.

Sin embargo, el biselado de las ranuras aumenta la dispersión en el motor y empeora las características del factor de potencia del motor.

- El aumento del entrehierro influye favorablemente en la reducción de los momentos parásitos y en consecuencia en la disminución de las pérdidas adicionales en carga, pero como empeora el factor de potencia y aumenta la corriente de corto circuito, esta idea sólo se aplica cuando se aumenta el entrehierro a fin de reducir las pérdidas mecánicas y la mejora en este aspecto es una cuestión subsidiaria.

Rendimientos.

Una vez conocidas todas las pérdidas de energía se determinará el rendimiento por aplicación de las siguientes fórmulas.

- Motores de corriente continua.

$$\eta = \frac{U_{red} * I_{red} - \Sigma_{perdidas}}{U_{red} * I_{red}}$$

- Motores de corriente alterna

*Síncronos

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_L I_L \cos \alpha - \Sigma_{perdidas}}{\sqrt{3} U_L I_L \cos \alpha}$$

Siendo:

U_L = Tensión de línea.

I_L = Intensidad de línea.

$\cos \alpha$ = Factor de potencia.

En este caso se ha supuesto que la corriente de excitación procede de una excitatriz movida por el propio motor.

*Asíncronos

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_L I_L \cos \alpha - \Sigma \text{perdidas}}{\sqrt{3} U_L I_L \cos \alpha}$$

Los siguientes parámetros influyen en el rendimiento del motor:

- Potencia nominal del motor.

El rendimiento de los motores eléctricos crece con la potencia nominal.

- Carga relativa del motor.

El rendimiento de los motores eléctricos tiene un valor máximo correspondiente a la carga nominal y decrece cuando trabaja a carga parcial o sobrecargado.

- Velocidad de giro.

A igualdad de potencia, las máquinas más veloces tienen mayor rendimiento.

Existe una metodología precisa para la medición de las diferentes pérdidas que puede consultarse en la bibliografía especializada o en las normas correspondientes.

Pérdidas Resultantes.

Además de las pérdidas propias, en la operación del motor se dan los siguientes tipos de pérdidas:

- Pérdidas producidas por la modificación de la velocidad de la máquina(energía cinética):

Puesta en marcha, aceleraciones por cambio de régimen y frenado.

- Pérdidas originadas en las transmisiones al transformar las características mecánicas(velocidades, pares) de la potencia.

El rendimiento de las transmisiones se obtiene aplicando la fórmula:

$$\eta_{tot} = \frac{N}{P_o + K_p N + N} 100$$

en dónde:

P_o = Pérdidas en vacío: igual a la energía consumida en mover la transmisión de vacío sin transmitir carga(watios).

K_p = Coeficiente de pérdidas variables, función del tipo de transmisión.

N = Potencia transmitida(watios).

P_t = Pérdidas totales que son iguales a $p_o + K_p N$ (watios).

En el Cuadro 3 se ha tratado los valores medios de K_p del rendimiento total de algunos tipos de transmisiones.

Cuadro 3.- Transmisiones.
Valores del rendimiento y del coeficiente de pérdidas variables

Tipo de transmisión	Coeficiente k_p	Rendimiento(%)
Engranajes		
*Alta presión	99	
*Presión	98	0,01 – 0,06
*Media Presión	96	
*Baja Presión	94	
Correa		
*Plana abierta	98	0,02 – 0,05
*Igual con rodillos tensores	95	0,04
*Trapezoidal	96	
Tornillo sin fin		
*De una entrada	70 – 75	
*De dos entradas	75 – 82	0,06 – 0,30
*De más de dos entradas	82 – 94	
Cadena	96 – 98	0,02 – 0,04
Por rozamiento	70 – 95	0,05 – 0,30

Regulación de los Motores.

Cuando el ciclo de trabajo requiere frecuentes arranques y paradas es necesario sobredimensionar el motor para que no se quemé.

*Existen varios procedimientos para arrancar, frenar y parar los motores eléctricos cuyas peculiaridades, ventajas e inconvenientes pueden consultarse en cualquier libro especializado. En este capítulo se hará hincapié en la importancia que tiene el evitar en lo posible el funcionamiento intermitente de los motores por el consumo energético que se gasta en aceleración y frenadas y porque obliga a seleccionar motores mayores que los estrictamente necesarios que tienen que trabajar con rendimientos y factores de potencia reducidos.

*En muchos sectores industriales, bien sea por imperativos del propio proceso o para conseguir un ahorro de energía, es preciso regular la velocidad del motor. En los Cuadros 4, 5 y 6 se puede consultar varios procedimientos clásicos de regulación de velocidad de motores y sus características.

Cuadro 4 Regulación de Velocidad en Motores de Corriente Continua

Procedimiento de regulación	Características
1.º Variación de la tensión (Ejemplo: Grupos Leonard y similares).	Indicado cuando las variaciones de velocidad son muy amplias. La regulación de velocidad es muy progresiva desde 0 a V máx. Puesta en marcha no reostática. Pérdidas de potencia por regulación muy reducida.
2.º Caída de tensión en el inducido del motor.	La potencia suministrada por la red permanece invariable. La potencia útil disminuye proporcionalmente a la velocidad porque aumentan las pérdidas con la velocidad y disminuye el rendimiento. Las condiciones de refrigeración del motor empeoran.
3.º Variación de la excitación	En motores con excitación compuesta, la potencia suministrada, y la potencia útil crecen con la velocidad y el rendimiento prácticamente no varía y en algún caso puede hasta aumentar. En motores Serie con seccionamiento del inducido la potencia suministrada aumenta, la potencia útil disminuye y el rendimiento baja.

Cuadro 5 Regulación de Velocidad en Motores Asíncronos. Procedimiento por Parte del Rotor

Procedimiento de regulación por parte del rotor	Características
1.º Variación de la resistencia óhmica del rotor	Utilizable en motores de rotor bobinado con anillos de contacto mediante conexión en serie de reostato en el circuito rotórico, la potencia suministrada permanece invariable pero la potencia útil disminuye prácticamente con la disminución de la velocidad, y el rendimiento lo hace en el mismo grado. Es un procedimiento poco económico.
2.º Acoplamiento en cascada.	Sustitución de los reostatos rotóricos por motor asíncrono, acoplado en cascada con el que se regula. Es posible obtener como mínimo las siguientes velocidades: <ul style="list-style-type: none"> • La propia del motor anterior. • La propia del motor posterior. • La de conexión directa de ambos motores. • La de conexión inversa de ambos motores.

Cuadro 6 Regulación de Velocidad en Motores Asíncronos Trifásicos. Procedimiento por Parte del Estator

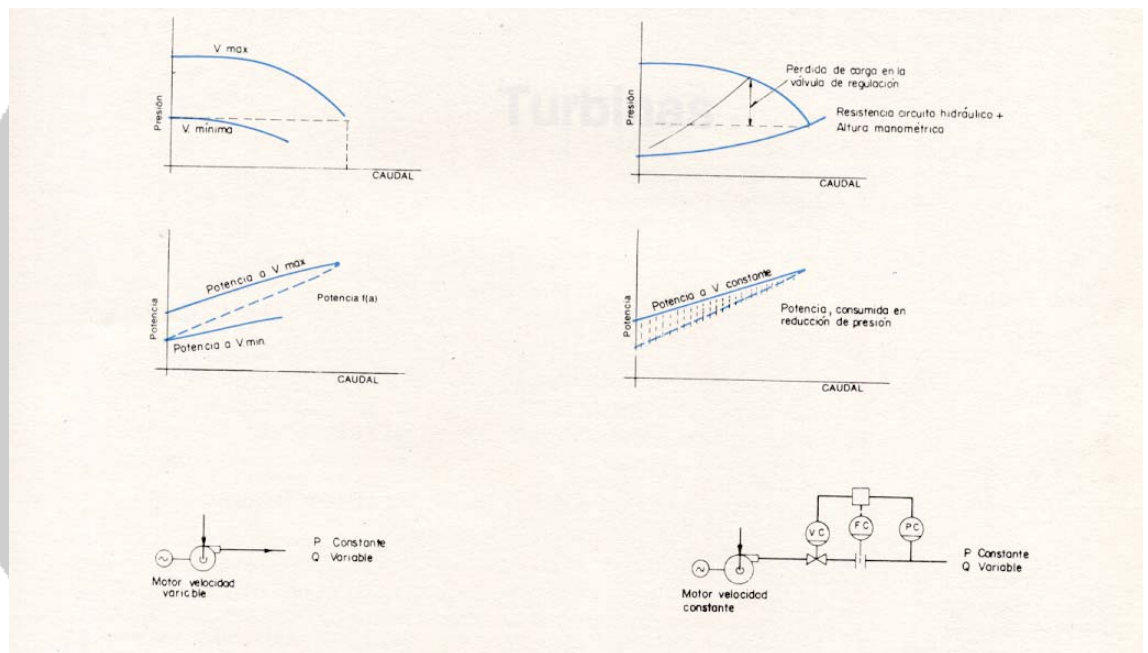
Procedimiento de regulación por parte del rotor	Características
1.º Variación de la tensión aplicada al motor.	Da lugar a un campo de regulación de velocidades muy reducido. Su utilización se reserva a dispositivos especiales y de reducida potencia donde se busca más la seguridad que la economía de explotación.
2.º Variación del número de pares de polos (p).	Regulación de velocidad por escalones ($n_1 = f_1 / p$). Se construyen motores de este tipo de 2, 3 y 4 velocidades. Las principales características de estos motores son: los rendimientos más altos corresponden a las velocidades menores, los factores de potencia mayores corresponden a las velocidades mayores, los deslizamientos mayores se dan a las velocidades más altas. Las demás características no varían apenas.
3.º Variación de la frecuencia de la tensión aplicada al motor.	Se requiere una red de alimentación especial (generadores síncronos de velocidad variable, alternadores de colector, convertidores iónicos, instalación con semiconductores. Si se desea mantener constantes el rendimiento, factor de potencia, capacidad de sobrecarga y deslizamiento absoluto, es preciso modificar la tensión de alimentación en dependencia de la frecuencia, de acuerdo a lo que se desea. <ul style="list-style-type: none"> 1.º Regulación a par constante. $V'_1 = V_1 \cdot (f'_1 / f_1)$ 2.º Regulación a potencia constante. $V'_1 = V_1 \cdot (f'_1 / f_1)^{1/2}$ 3.º Par proporcional al cuadrado de la frecuencia $V'_1 = V_1 \cdot (f'_1 / f_1)^2$

Actualmente la concepción de la regulación de los motores está experimentando una variación muy profunda a causa de la aplicación de sistemas electrónicos de potencia.

*Disminuye los costes de mantenimiento al tratarse de equipos estáticos.

Como ejemplo de la economía energética conseguida por la regulación de la velocidad de un equipo, se presenta en la Figura 15 la aplicación a una bomba y su comparación con el sistema de válvula de control.

Figura 15.- Ejemplo de Regulación de Velocidad en Motores



*Finalmente se menciona la aparición de los denominados motores de alto rendimiento, del orden del 10% superior a los de diseño tradicional, que se consigue utilizando mayores cantidades de cobre y chapa magnética, así como otras novedades menores en el diseño.

eoi

eoí

Secado

eoi

Definición y Objeto del secado.

El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que le impregna, moja o disuelve, de forma que se obtiene un producto final o como intermedio, en un proceso de fabricación dado. Este líquido suele ser el agua, natural o mezclada, pero también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico o inorgánico.

Bajo esta definición, basada en el objeto fundamental del secado, se incluyen las diferentes posibilidades técnicas de la operación: secado clásico, secado a baja temperatura, sistemas de evaporación y concentración, sistemas de deshidratación e incluso sistemas de secado mecánico.

Tradicionalmente se venía reservando la denominación de secado a la operación basada en la desecación térmica, asignándose otras acepciones a las operaciones de deshidratación mecánica (escurrido filtración presión centrifugado, vibración, oreo, etc.). Sin embargo, este planteamiento estrictamente semántico, no es del todo conveniente, en cuanto implica dirigir la atención, al hablar del secado, hacia los procesos térmicos casi en exclusividad, lo que pueda conducir a dejar de considerar otras alternativas con un más adecuado equilibrio energético.

En efecto, desde el punto de vista energético se concede actualmente a los procesos de secado mecánico una alta revalorización, si bien cuenta con notables limitaciones planteadas por la naturaleza del producto de secar, por las características de los equipos de secado y por el rendimiento de éstos.

El secado puede considerarse como una operación energética elemental y especialmente como una de las operaciones térmicas básicas de la industria, junto al calentamiento de piezas y cuerpos para su transformación, a los tratamientos térmicos de diversos materiales a baja y alta temperatura y al acondicionamiento de locales.

Es indudable la dificultad de abordar el estudio por separado de una cualquiera de estas operaciones elementales, dadas las múltiples conexiones e interdependencias existentes. Por otra parte, también resulta difícil deslindar, a efectos de análisis de aportaciones energéticas, estas operaciones de otras de naturaleza mecánica, eléctrica o afín, directa o indirectamente implicadas también en los procesos de secado.

Por consiguiente, el secado puede considerarse como una operación industrial básica que no siempre coincide con una fase o etapa concreta de un proceso industrial determinando. No puede entenderse como la única operación elemental que consume energía a lo largo de ese proceso industrial. Incluso no puede asimilarse, en muchos procesos, a las fases en las que a base de energía térmica o mecánica (o ambas combinadas) se aborde un determinado objetivo de eliminación del líquido de un producto.

Los principales objetivos concretos que se suelen perseguir en las operaciones de secado pueden agruparse como sigue:

- a) Facilitar un procesos industrial posterior.
- b) Reducir costes (p.e.: en transporte)
- c) Permitir la utilización satisfactoria, final o intermedia, de un determinado producto.
- d) Permitir la conservación, almacenamiento y transporte de un producto.
- e) Mejorar el rendimiento de una instalación o un equipo.
- f) Permitir el posterior aprovechamiento de subproductos.

El examen detallado de esta formulación de objetivos, bajo el enfoque de la problemática energética del procesos, lleva a importantes conclusiones. En primer lugar es evidente que el creciente coste de la energía invita a reconsiderar la idoneidad de ciertos procesos o la conveniencia de la utilización final de algunos productos en la formas ahora usuales, en cuanto implican la aplicación de procesos crecientemente costosos por su consumo energético. En segundo lugar se deduce la conveniencia de un replanteamiento en profundidad de los criterios vigentes en relación con la ubicación industrial de instalaciones de secado. Y, finalmente, comprende la necesidad de enfocar los esfuerzos de investigación y desarrollo tecnológico hacia localización de nuevos procesos sustitutivos, capaces de alcanzar objetivos similares mediante sistemas que exijan menores consumos energéticos.

Secado en la industria: repercusión energética.

La amplitud de la definición del secado, la diversidad de objetivos que persigue y la abundancia de factores y variables que inciden en dicho proceso, hacen muy compleja la tarea de evaluar la repercusión energética del mismo dentro de un contexto industrial determinado.

Sin embargo, es fácil intuir que el secado tiene una gran influencia en el cómputo energético final de una determinada estructura económico industrial. Por ello en numerosos países se han realizado notables esfuerzos para calcular con suficiente exactitud la incidencia energética de este proceso. La principal condición inicial para realizar dicho cálculo es acogerse a un marco concreto de definición de secado. No existe en la actualidad esa definición concreta, ni se dispone de estudios sobre valoración del peso energético del secado y, por consiguiente, tan sólo pueden hacerse cálculos aproximados acerca de la misma. Sin embargo, esta evaluación es necesaria para entender el alcance de las posibilidades reales existentes en cuanto a mejora de los sistemas energéticos por ramas industriales y por áreas de actividad dentro de cada rama industrial.

De los estudios realizados sobre la incidencia del secado en el consumo energético se puede concluir que, en un país suficientemente desarrollado, los procesos de secado absorben, por término medio, entre el 4y el5% de toda la energía consumida en un año en ese país, lo que equivale aproximadamente a un 11% de la consumida exclusivamente en la industria. Este último porcentaje se reparte en un 8% en secado propiamente dicho y un 3% en evapoconcentración. Estos datos dan idea del gran peso energético que llega a alcanzarse en un determinado estadio de desarrollo industrial. A su vez, si se tienen en cuenta las consideraciones que más adelante se formulan sobre el carácter “dispendioso” de este proceso, se encuentra un campo de indudable interés para abordar importantes planteamientos de ahorro energético.

Naturalmente, la incidencia del consumo energético del secado varía notable de unos sectores a otros, siendo las industrias Sideronaval y Química (con porcentajes de repercusión del orden del 11%y 7 % respectivamente) las que energéticamente se ven grabadas por la necesidad de secar.

Un aspecto interesante a resaltar se refiere a la diferenciación entre operaciones entre operaciones de secado propiamente dichas y operaciones de evapoconcentración por implicar importantes diferencias en cuanto a consumos específicos por tonelada de agua eliminada. Así, en los procesos de secado propiamente dichos, se alcanzan rendimientos medios de 1.200 kcal/kg y, en el segundo, de 250 a 300 kcal/kg. Se comprueba que las operaciones de secado propiamente dicho tienen un peso energético superior a las de evapoconcentración.

A continuación se recogen los aspectos esenciales del proceso de secado en diferentes industrias, indicando la incidencia porcentual del proceso en el consumo de combustible directo de esta industria (sin incluir el consumo de energía eléctrica por tener ésta poco peso, en general, en los procesos de secado):

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 86 de 130

Industrias Extractivas

- Principales áreas de Aplicación: Minería potásica.
- Operaciones básicas: Secado por convección.
- Temperatura de trabajo: 100°C.
- Proceso desecación (%inicial a % final): 75 a 90.
- Energía mínima teórica (th/t): 650.
- Equipos comúnmente utilizados: Secadores rotativos.
- Consumos específicos reales (th/t): 900 a 1.000.
- Grado de eficacia: 65%.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles directos de esta industria: 17%.

Electrometalurgia

- Principales áreas de aplicación: Producción de alúmina hidratada, aleaciones térmicas, electrodos, etc.
- Operaciones básicas: Concentración de soluciones sódicas y secado directo.
- Temperatura de trabajo: 75 y 1.000°C.
- Energía mínima teórica (th/t): 630 y 640.
- Equipos comúnmente utilizados: Evaporadores de efecto múltiple y secadores rotativos.
- Consumos específicos reales (th/t): 200 a 900.
- Grado de eficacia: 65%.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles directos de esta industria: 17,6%.

Cemento

- Operaciones básicas: Convección directa.
- Temperaturas de trabajo: 100 a 450°C.
- Proceso de desecación(%inicial a % final): 60 a 96.
- Energía mínima teórica(th/t): 700.
- Equipos comúnmente utilizados: Hornos de cocción.
- Consumos específicos reales (th/t): 1.000 a 1.200.
- Grado de eficacia: 58 a 70%.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles directos de esta industria: 30%(proceso vía húmeda).

Materiales de Construcción

- Principales áreas de aplicación: Refractarios, cerámica, gres, etc.
- Operaciones básicas teórica: secado por convección.
- Temperaturas de trabajo: 80 a 120°C.
- Proceso de desecación (% inicial a %final):
- Energía mínima teórica (th/t): 640.
- Equipos comúnmente utilizados: Secadores de aire.
- Consumos específicos reales (th/t): 900 a 1.200.
- Grado de eficacia: 55 a 70%.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles directos de esta industria: 38,5%.

Industria Textil.

- Operación básicas: convección forzada o conducción.
- Temperaturas de trabajo: 80 a 140°C.
- Energía mínima teórica (th/t): 650
- Equipos comúnmente utilizados: secaderos estáticos o dinámicos.
- Consumos específicos reales(th/t): 1.200 a 3.500
- Grado de eficacia: 12 a 54%
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustible directos de esta industria: 36,5%.

Papel y Cartón

- Principales áreas de aplicación: Fabricación de pastas, concentrado y fabricación de papel.
- Operaciones básicas: Convección, evaporación y conducción.
- Temperaturas de trabajo: 100 a 130°C.
- Procesos de desecación (% inicial a % final): 40 a 95.
- Energía mínima teórica (th/ t): 650.
- Equipos comúnmente utilizados: Secado aeromóvil, evaporadores y cilindros a vapor.
- Consumos específicos reales (th/t): 700 a 1.200.
- Grado de eficacia: 60 a 90%.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustible directo de esta industria: 61%.

Industrias Agrarias, Alimentarias y Afines.

- Principales áreas de aplicación: Azúcar, leche, deshidratación en general, cereales, forestal, etcétera.
 - Operación básicas: Aireación, concentración, atomización, evaporación, cristalización, etcétera.
- Temperaturas de trabajo: muy variable (60 a 900°C).
- Proceso de desecación (% inicial a % final): muy variable (del 9/40 al 45/95).
- Energía mínima teórica (th/t): 640 a 700.
- Equipos comúnmente utilizados: Hornos rotativos, evaporadores, atomizadores, cristalizadores, secaderos de aire, etc.
- Consumo específicos reales (th/t): muy variable (200 a 1.500).
- Grado de eficacia: 45 a 95 %.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles directos de esta industria: 62 %.

Química

- Operación básica: Múltiples posibilidades.
- Temperatura de trabajo: 60 a 130°C.
- Energía mínima teórica: Muy variable.
- Equipos comúnmente utilizado: Múltiples posibilidades.
- Consumos específico reales: Muy variable.
- Incidencia porcentual del proceso de secado en el consumo de combustibles
 - Directos de esta industria: 26%.

Esta rápida revisión esquemática de la incidencia y las características del proceso de secado en diferentes áreas industriales, pone de relieve inmediatamente numerosas e importantes conclusiones acerca de la influencia de este proceso en un determinado balance energético industrial de un país, así como de las posibilidades concretas de actuación con vistas a lograr mejoras en los sistemas energéticos correspondientes.

Una primera conclusión importante es que las industrias agroalimentarias son las más importantes usuarias del proceso de secado y, consiguientemente, las que utilizan un considerable volumen de combustible directo en este tipo de procesos, que supone más del 60% del total de combustible directo consumido en esta industria.

Otras cuatro áreas industriales (Química, Cemento, Papel y textil) absorben importantes volúmenes de combustibles para atender procesos de secado, que en todos los casos implica más del 25% del total de combustibles directos consumidos por cada una de esas industrias.

Una segunda conclusión se refiere a la incidencia de las operaciones de evapoconcentración y las posibilidades de mejora energética implícitas. Esta incidencia puede evaluarse próxima al 6% del consumo energético industrial en forma de combustible directo (excepción hecha del área sideronaval). Pues bien, las técnicas y los sistemas para mejorar la eficacia energética de estas operaciones son bien conocidas y experimentadas tal como se expone en el capítulo 8. Esto permite pensar en la posibilidad de una pequeña vía de recuperación energética con tecnología disponible.

Una tercera conclusión se refiere al proceso de desecación propiamente dicho. En estas operaciones se calculan unos consumos específicos medios de unas 1.200 kcal/kg de agua evaporada. De estas 1.200 kcal, 650 se encuentran en el calor latente del aire húmedo extraído y otras 350 en el calor sensible. Tan sólo el resto (200 kcal) permanecen como energía ligada o se pierde; es la energía irrecuperable. Esto quiere decir que por cada 1 m tep consumida en el proceso de desecación propiamente dicho, 850,000 tep, aproximadamente, constituyen ENERGÍA TÉCNICAMENTE RECUPERABLE, con el rendimiento práctico de recuperación que permitan las tecnologías disponibles.

Sin embargo, las tecnologías disponibles indican que se está aún lejos de alcanzar un rendimiento de recuperación aceptable. Se calcula que con los conocimientos actuales se podrían recuperar entre 16.000 y 20.000 tep por cada 1 m tep consumidos en procesos de secado, lo cual está muy lejos de ser un rendimiento aceptable.

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 91 de 130

Es claro que este planteamiento refleja una situación definida por una estructura dada, limitada por las tecnologías disponibles. Sin embargo, revela un hecho cierto, íntimamente ligado al proceso de secado: el envío de energía a la atmósfera; también es cierto que este hecho se agrava de acuerdo con el proceso económico e industrial y esto representa unas posibilidades técnicas de recuperación que se deben referir a la aplicación de inversiones rentables. Existen, por tanto, en este sentido, un amplio campo de investigación y desarrollo tecnológico en el que el objetivo básico ha de ser elevar rápidamente esa baja cota capacidad técnica de recuperación de energía enviada a la atmósfera en los necesarios criterios de rentabilidad de las inversiones a realizar.

Una cuarta conclusión hace referencia al bajo uso de la electricidad y la electrotermia en los procesos de secado. Sin embargo, es probable que se vaya a asistir a un desarrollo de las técnicas mecánicas de eliminación de agua (incluyendo las de turbocompresión, termocompresión y bombas de calor) basadas en consumos de energía eléctrica o mecánica, lo que permitirá un importante ahorro global en relación con el secado térmico. Análogos comentarios pueden hacerse en cuanto a la puesta a punto de técnicas de secado por aireación, radiación, reciclado y recuperación por ventilación, todas ellas también basadas en el consumo de energía eléctrica. Este planteamiento de ahorro potencial se orienta hacia unas importantes posibilidades de ahorro energético que permite elevar sensiblemente las economías energéticas actualmente realizadas.

Una quinta conclusión se refiere a la necesidad de plantear políticas industriales en las que se contemplen, sobre la base de rigurosos estudios de logística industrial, la idoneidad de determinadas industrias sobre la base de criterios de inversión, producción y economía energética.

Sobre estos aspectos y conclusiones se abundará en los apartados posteriores, en los que se hace referencia detallada a los principios básicos y a las técnicas y tecnologías de secado, con vistas a plantear los aspectos energéticos fundamentales de este proceso las posibilidades de mejorar energética existentes en el mismo.

Principios básicos del secado y sus implicaciones energéticas.

El proceso de secado se ajusta a unos principios básicos y depende de unos factores o condiciones fundamentales que, de por sí, entrañan implicaciones energética de gran importancia.

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 92 de 130

Dentro de este contexto hay que hacer referencia a los aspectos siguientes:

- Propiedades del producto a desecar como condicionantes del proceso de secado.
- Mecanismo de transferencia de calor, transferencia de masa circulación interna.
- Períodos y duraciones de secado.

Características del producto a desecar.

En el producto a desecar hay que considerar los aspectos siguientes:

- Presentación de la humedad contenida.
- Mecanismo de fijación de la humedad.
- Mecanismo de transferencia de la humedad

Este líquido puede ser adherente, capilar o de volumen, según la naturaleza de la vinculación líquido-cuerpo. En definitiva, cada cuerpo presenta características propias que le hacen reaccionar de forma diferente ante la humedad de una determinada atmósfera (tensión de vapor) o el calor que se le suministra procedente del cualquier fuente térmica (deseccación). En consecuencia, cada cuerpo, a una determinada temperatura, tiene un comportamiento particular, ante un determinativo ambiente de humedad.

La energía para liberar a un cuerpo de un líquido agregado, dependerá de las características de sorción de ese cuerpo. Este planteamiento es sumamente importante ya que el conocimiento profundo de los mecanismo de fijación y presentación de la humedad es básico para identificar los límites de viabilidad de las aplicaciones de energía para el secado, porque este análisis de las propiedades fundamentales del producto debe llevar identificar alternativas de recambio, en procesos /y/o producto, que permitan rebajar los consumos de energía usualmente requerido

Secado por arrastre y por ebullición

SECADO POR EBULLICIÓN.

Este planteamiento esta íntimamente relacionado con el propio proceso de secado. Cabe hacer referencia a dos grandes grupos de procesos: Por ebullición y por arrastre.

La ebullición de un líquido se produce cuando temperatura es tal que la presión de vapor p_a de dicho líquido es igual a la presión total ambiente p_t :

$$P_a = P_t$$

Este equilibrio de presión esta, lógicamente, influenciado por el balance térmico existente. Así:

- Para el agua pura a la presión atmosférica la temperatura necesaria es 100°C
- Para las soluciones acuosas la presión de vapor del agua desciende por la presencia de cuerpos no volátiles disueltos y la temperatura necesaria será superior a 100°C,
- Para los sólidos húmedos, los fenómenos son análogos: según el estado del agua en el producto, esta hierve a 100°C o más

En todos los casos la temperatura de ebullición depende de la presión, siendo mas baja con vacío.

La ebullición propiamente dicha (formación de burbujas de vapor) es más difícil de observar en los sólidos o los cuerpos pastosos que en los líquidos

En todos los casos, el proceso de evaporación esta determinado por el sistema de aporte de calor latente de evaporación. Este aporte es efectuado:

- Por conducción, a partir de una superficie caliente en contacto con el producto.
- Por radiación o generación interna de calor, debido a la exposición a rayos infrarrojos, a microondas o por un calentamiento dieléctrico.
- Por convección, a partir de vapor de agua sobrecalentado o de un fluido hirviendo.

La ebullición permite el secado de productos muy oxidables o la eliminación de un disolvente volátil, combustible en presencia de aire, por ebullición en un circuito cerrado.

SECADO POR ARRASTRE

En el secado por arrastre, al ponerse en contacto un cuerpo húmedo con aire caliente y seco, se establece una diferencia de presión parcial de agua y temperatura, entre ellos, que se caracteriza por:

- Una transferencia de calor entre el aire y el producto por efecto del salto térmico.
- Una transferencia de agua que se efectúa en sentido inverso por baja humedad relativa en el aire.

El secado se llama isoentálpico si la energía necesaria para evaporación del agua es exactamente igual a la aportada por el aire caliente.

Tanto en la ebullición como el arrastre, es la presión del vapor de agua del producto quien determina los intercambios entre el aire y el producto.

En resumen la relación fundamental de este equilibrio es:

$$P_p = P_t * A_w$$

en dónde:

P_p = presión de vapor de agua de una sustancia.

P_t = presión de vapor de agua pura a la misma temperatura t .

A_w = actividad del agua o grado higrométrico del aire en el equilibrio entre el sólido y la atmósfera que le rodea.

Las anteriores definiciones permiten medir la A_w de un producto, determinando la humedad relativa de una pequeña cantidad de aire en equilibrio con ese producto. Existe pues, una relación entre a_w y n_s (contenido en agua, medido en kg de agua /kg de materia seca) a una temperatura dada. Esta relación se representa por la "isoterma de sorción del producto"

En la Figura 16 se representa gráficamente esta relación para cuerpos de diferentes grados de higroscopicidad. Y en la Figura 17 se recogen curvas de sorción de diferentes cuerpos.

Figura 16.- Curvas de Porción de Agua

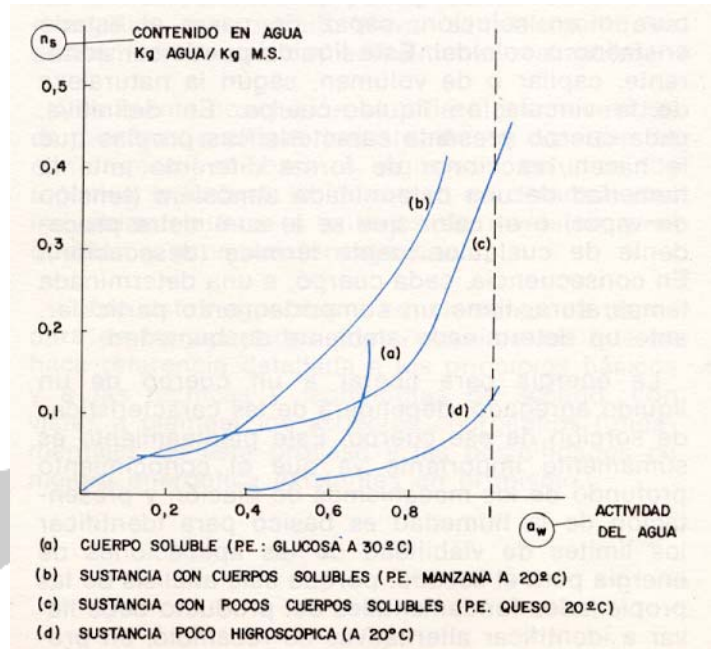
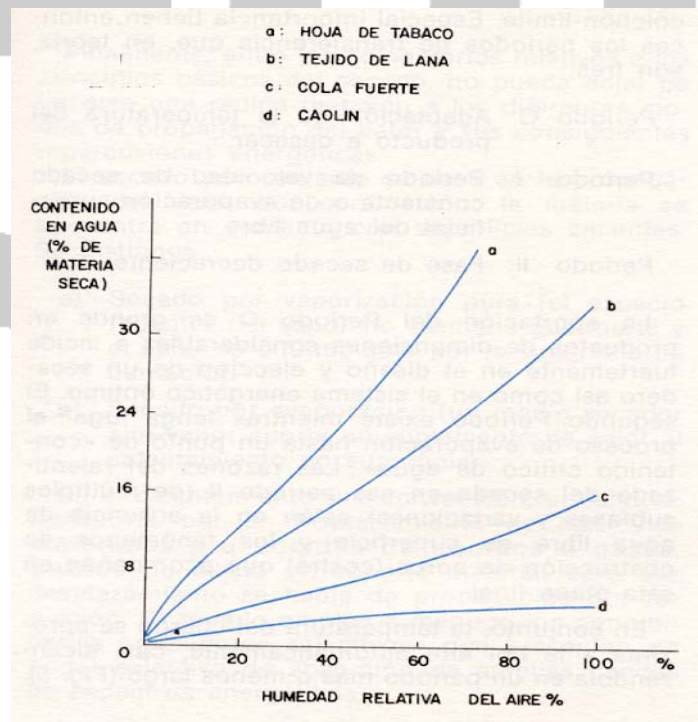


Figura 17.- Isotermas de Porción a 25 °C



La determinación de las curvas de sorción son de gran importancia para identificar con eficacia los condicionantes básicos de cualquier proceso de secado.

En definitiva, cuando $A_w = 1$ se dice que el producto tiene "agua libre" y si A_w es sensiblemente menor que 1, se dice que el producto tiene "agua ligada" en este ultimo caso el de secado es más difícil, exige mayor aporte energético.

Preparación previa del producto

La isoterma de secado variará según presente el agua dentro del producto de forma que una primera "deshumidificación" por procedimiento de bajo consumo energético o mediante aportaciones energéticas sustitutivas facilitarían las fases finales del proceso de secado, exigiendo menor aporte energético.

No siempre es fácil esta preparación previa del producto pues hay que tener en cuenta numerosos factores implícito: materia prima, relación tiempo /temperatura, aceleración de modificaciones internas, calidad final, aspecto higiénico contaminantes, etc.

Se tratará de conjurar la viabilidad del pretratamiento y el tratamiento del secado y esos factores incidentes

También merece atención la relación tiempo de secado/temperatura, directamente ligada a la curva de sorción del producto y al etapa de preparación previa. La racionalización de estas variables puede llevar a dar preferencia a secaderos de baja temperatura y de reducido período de secado. ; a investigar las condiciones de secado que eviten la obtención de un producto final inútilmente caliente: a favorecer el secado neumático, etc.

Transferencia de calor y de masa

Otros de los principios básicos del proceso de secado se refiere al comportamiento del aire húmedo. El contenido en energía de este aire húmedo viene dado por la entalpía másica de las mezclas aire-agua. Este contenido, medible por muy diversos procedimientos, tiene gran interés desde el punto de vista energético, por definir el entorno de condicionante externo en los que se basan los cálculos de recepción de energía recuperable. En esencia, el fenómeno evaporación que desempeña papel primordial en el secado, hay que distinguirlos del clásico de vaporización ya que en aquel, la presión de vapor del líquido de la superficie humedad es inferior a la presión total.

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 97 de 130

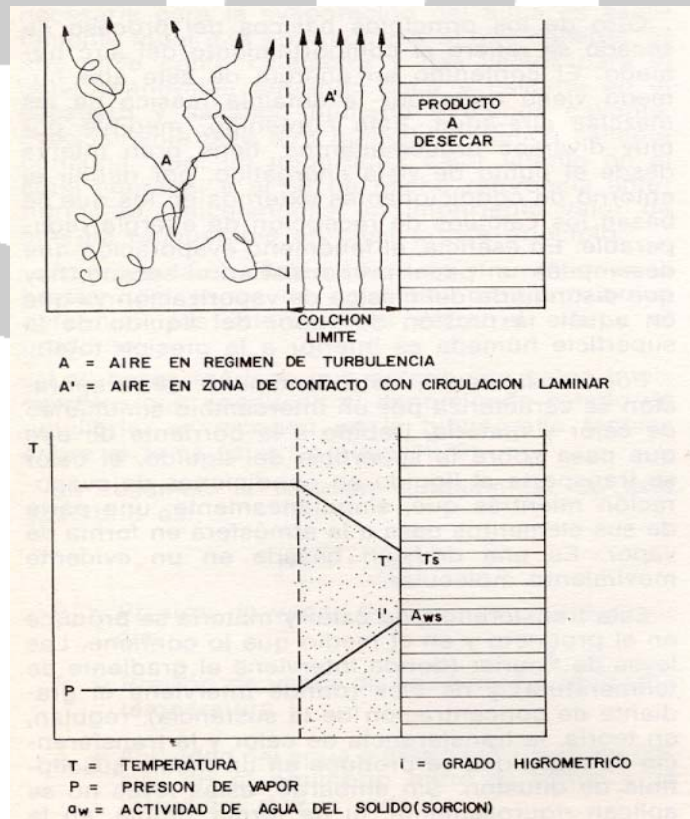
Por consiguiente, este fenómeno de evaporación se caracteriza por un intercambio simultaneo de calor y materia. Debido a la corriente de aire que pasa sobre la superficie del líquido, el calor se transporta al líquido en condiciones de evaporación mientras que, simultáneamente, una parte de su elemento pasa a la atmósfera en forma de vapor. Es una difusión basada en un evidente movimiento molecular.

Esta transferencia de calor y materia se produce en el producto y en el medio que lo contiene

Por otra parte esta el proceso de transferencia de calor y de materia en aire que rodea el producto. En la mayoría de los secaderos industriales este aire adquiere un cierto régimen de turbulencia dejando siempre un colchón – límite de separación, con circulación laminar, como se representa en la Figura 18. Esta masa de aire A esta en equilibrio de humedad y temperatura con la superficie del sólido de forma que:

$$T = T_s \quad I = A_{ws}$$

FIGURA 18.- Transferencia de Calor y Masa en el Aire y la Superficie del Sólido



La Fases del Secado

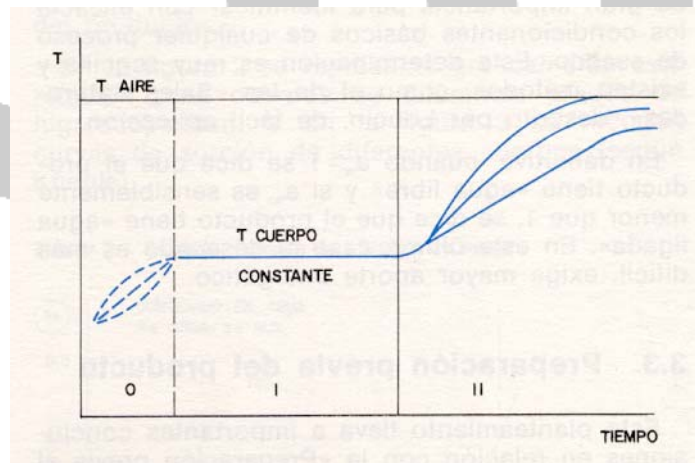
Estos fenómenos caracterizan la transferencia de calor y materia y se admiten que toda la resistencia a está, que hay que vencer mediante aportación energética, se sitúa en esa zona de colchón – límite. Especial importancia tiene entonces los periodos de transferencia que, en teoría, son tres:

- Periodo 0: Adaptación del a la temperatura del producto a desecar.
- Periodo I: Periodo de velocidad de secado constante o de evaporación superficial del agua libre.
- Periodo II: Fase de secado de decreciente.

La aportación del periodo 0 es grande productos de dimensiones considerables e incide fuertemente en el diseño y elección de un secadero así como en el sistema energético óptimo. El segundo periodo existe mientras tenga lugar el proceso de evaporación hasta un punto de “contenido crítico de agua”. Las razones del ralentizado del secado en ese periodo II (de múltiples subfases y variaciones) están en la ausencia de agua libre de superficie y los fenómenos de obstrucción de poros (costra) que acompañan en esta etapa fina.

En conjunto, la temperatura del cuerpo se aproxima a la del aire automáticamente casi alcanzándola en un periodo más o menos largo (Figura 19).

Figura 19.- Evolución de la Temperatura en el Curso del Secado



El cálculo de estos periodos es muy complejo pero necesario pues permite conocer con exactitud los requerimientos energéticos. , en cada momento, para evitar no sólo el deterioro del producto sino el derroche de energía.

Sistemas de propagación del calor

Finalmente, entre los comentarios relativos a los principios básicos del secado, no puede dejar de hacerse una rápida mención a los diferentes modos de propagación del calor y sus consiguientes repercusiones energética.

El secado por contacto se basa en la propagación del calor por conducción: la materia se encuentra en contacto con superficie caliente. Se distingue:

- A) Secado por vaporización pura (el espacio receptor del vapor no contiene gas inerte y el calor se difunde solo por la superficie de contacto)
- B) Secado por vaporización (un medio secador aire –vapor aporta un suplemento de calor al calentamiento en superficie)

En el calentamiento por convección, el calor se transporta por el desplazamiento de partículas materiales procedentes de líquidos o gases. Cuando no existe un soporte material para ese desplazamiento se habla de propagación por radiación. El secado emplea a menudo los denominados "radiadores selectivos" que presenta un poder selectivo de absorción de amplias bandas de espectros energético.

Además de los anteriores sistemas de propagación de calor están en el calentamiento por inducción de materias conductoras de la electricidad (metales, carbón y electrolitos) mediante campo de corriente alterna de media frecuencia. Frente a este sistema está el prometedor secado dieléctrico, basado en la propagación del calor por desprendimiento calorífico interno mediante la generación de campos eléctricos de alta frecuencias. La ampliación de este principios a ciertos proceso de secado (p. e.: madera) puede ofrecer notable ventaja energética, incrementada a un si se realiza al vacío (secado discontinuo al vacío).

Finalmente debe hacerse mención a un amplio numero de procedimientos especiales de aportación de calor: secado rápido a alta temperatura, secado por vapor sobre calentado, ampliación de gases de combustión como agentes de secado y utilización de aceite, productos químicos y disolvente en caliente, como agentes de secado. Todos estos procedimientos reúnen especiales ventajas o inconveniente para su ampliación en el proceso de secado, pero constituyen alternativas validas para intentar mejora del balance energético de cada proceso.

En resumen, la consideración global de todos estos principios básicos (características del producto, mecanismo de transferencia de calor y de masa y sistemas de propagación de calor), enfrentada al volumen energético que implica su aplicación en un proceso de secado determinado, permite reducir que están abiertos importantes campos de estudio e investigación que faciliten localizar y poner a punto alternativas sustitutivas de los procesos actuales, en beneficio de un importante ahorro energético.

Técnicas y tecnologías del secado.

Ya se ha destacado en el punto anterior que en el secado se integran dos fases diferentes: una de evaporación superficial y otra de transporte capilar y difusión interna. Este esquema pone de manifiesto la diferente incidencia de la sustancia a desecar (higroscopicidad, forma, presentación, uso, etc.) en cada fase del proceso de secado y las distintas dificultades existentes en cada fase para liberar el líquido retenido. De ello dependen las variables esenciales del proceso:

- Velocidad de secado del producto.
- Temperaturas del secado en cada fase.
- Duración del secado (tiempo de cada período).
- Eficacia del secado (contenido en humedad del producto)
- Energía consumida.
- Volumen de masa transferida.
- Energía recuperable.
- Velocidad del aire o fluido secador.

Estas dos fases se diferencian claramente en una curva general de secado. Es absolutamente necesario conocer en cada caso el punto de inflexión del proceso de secado. Sólo así se podrá dirigir el planteamiento del proceso con criterios de economicidad de energía:

A lo largo de todo el proceso tiene lugar importantes fenómenos de transferencia de masa y de calor que son los que deciden en qué forma se modifican los valores representativos de las variables citadas.

Estos fenómenos que condicionan el proceso de secado están, a su vez, influidos por el planteamiento general del propio proceso. Pueden considerarse varias posibilidades:

- a) Producto en reposo sometido a un paso de fluido en condiciones constantes. Es el caso más sencillo y se refiere al paso de una corriente caliente sobre una superficie plana.
- b) Secado de un producto en reposo por una corriente que pasa por encima de él o lo atraviesa (condiciones variables).
- c) Secado de un producto en movimiento mediante corrientes de igual sentido o contracorriente.

Tipos de Secaderos

Existe una amplísima gama de secaderos; esto se debe a la diversidad de productos a tratar, de volúmenes a secar y de condicionantes impuestos por el producto a secar, el fluido secador y el material de composición del secadero.

Tienen gran interés desde el punto de vista energético y merecen destacarse, por cuanto implica desarrollo tecnológico a tener en cuenta, los secaderos basados en procedimientos especiales de aportación de calor:

- Secaderos de radiación: pueden ser hornos de carga intermitente o túneles de secado y funcionan con o sin desplazamiento de aire. La base es el cuerpo radiante; recientemente han adquirido gran importancia los radiadores infrarrojos de cuarzo y los radiadores oscuros. Tienen gran interés en invernadero, lacas, tejidos, etc. En este grupo se encuentra los secaderos infrarrojos e radiadores luminosos, los radiadores catalíticos, los de banda por radiación infrarroja, Los canales de secado infrarrojos, los de ventilación por toberas y radiación, etc.
- Secaderos dieléctricos, a los que se hizo referencia en puntos anteriores
- Secado por congelación y/o liofilización, al que también se hizo referencia en apartados anteriores, y entre los que se encuentran las cámaras de secado los Shell – Freezing, los tubos de regulación y de los de pulverización y congelación

También tiene gran interés la clasificación de secaderos de Bimbenet, de gran sencillez, que introduce el criterio de duración del proceso del secado. A modo de resumen recordatorio de los tipos de secaderos, vale la pena recogerla aquí:

SECADEROS DE EBULLICIÓN

- a) Larga duración (varias horas): armarios de vacío, secaderos de tornillo calefactor, liofilizador al vacío, etc.
- b) Corta duración (varios minutos): cocción, microondas, etc.
- c) Ultra corta duración (decenas de segundo): cilindro calefactores, evaporador – secador de superficie lisa, etc.

SECADEROS DE ARRASTRE.

- a) Larga duración: armarios, bandas bandejas, túneles, verticales, tamices, etc.
- b) Corta duración: cilindro rotativos, transporte mecánico y neumático, fluidificación, etcétera.
- c) Ultra duración: Transporte neumático, dispersión, atomización, etc.

Criterios de elección de un proceso de secado y un secadero

Los criterios fundamentales a tener en cuenta en la elección de un proceso de secado y, consecuentemente, de un sistema de secado son:

- a) Tipos de producto (textura, forma, destino, presentación, etc.)

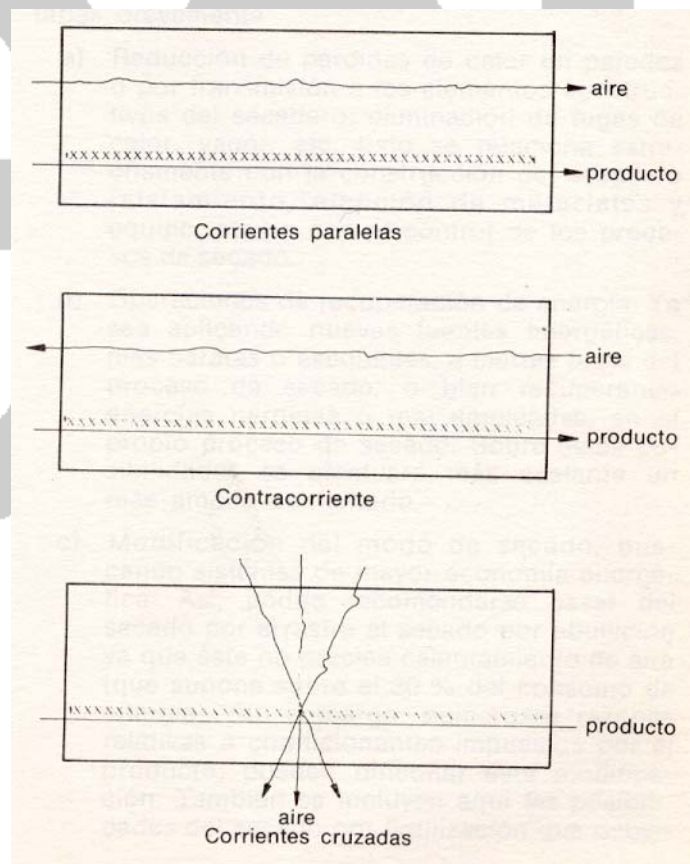
Este criterio delimita claramente las posibilidades de relación producto /elemento secador, las de aportación de calor y la duración del proceso. A sí, hay grande diferencias entre las posibilidades de secado de productos líquidos por pastosos, pulvurentos, contraíbles o desagradable, troceados o enteros, grande o pequeños, laminas, fibras, etcétera. Gran importancia tiene, en este sentido, la posibilidad de preparación previa, como ya se ha visto, sobre todo a efecto de ahorro energético.

b) Tipos de procesos básicos (ebullición o arrastre)

En general, el secado por ebullición comporta menores consumo energético, pero no siempre es él mas adecuado por la demanda de instalación o complejidad del proceso. Así, muchas industrias como las agroalimentarias tienden a utilizar el secado por arrastre. No obstante, las nuevas técnicas de secado por ebullición con vapor sobrecalentado. Abren importante perspectivas sobre la base del ahorro de energía y a la eficacia del proceso.

c) Tipos de circulación relativa aire/producto (corrientes paralelas contracorrientes o corriente cruzada, Figura 20).

Figura 20.- Circulación Relativa Aire-Producto en los Secaderos



La elección de un tipo de corriente tiene gran relación con las posibles modificaciones de calidad del producto. En la practica pueden combinarse varios tipos en soluciones mixtas o de reciclado.

d) Repercusiones energéticas

La importancia del conjunto, de criterios energético aconseja su tratamiento por separado

Aspectos energéticos del proceso de secado.

Se ha destacado anteriormente la necesidad de conocer prioridad al criterio del consumo energético en el planteamiento, cálculo y diseño de un sistema de secado. La prioridad de este criterio viene avalada por el hecho ya comentado de que entre el 4% y el 5% del consumo energético total de un país desarrollado se emplea en procesos de secado. Y también se ha calculado que una parte importante de la energía empleada en estos procesos se envía a la atmósfera en forma de aire caliente. Por consiguiente, es evidente la absoluta necesidad de prestar la máxima atención a los aspectos energéticos de estos procesos que podrían definirse como "dispendiosos de energía".

Criterios de consumo energético.

Para evaluar el consumo energético de un proceso de secado se puede recurrir a la aplicación de tres criterios fundamentales:

- Valor del consumo energético unitario del proceso (CEU)
- Cálculo de la relación de consumo energético (RCE)
- Definición del balance térmico del proceso.

El consumo Energético Unitario (CEU) de un secadero mide la cantidad de calor que se precisa aplicar para extraer la unidad de masa de agua (kcal/kg agua evaporada). Interesa que esta relación sea lo menor posible:

$$CEU = \frac{\text{Energía Suministada}}{\text{Agua Evaporada}}$$

La relación de consumo energético (RCE) permite comparar la eficacia energética del proceso (CEU) con el gasto de vapor:

$$RCE_t = \frac{\text{Cantidad de Vapor Gastado}}{\text{Cantidad de Agua Evaporada}}$$

Esta relación de consumo energético tiene un valor óptimo a una determinada temperatura, lo cual, a su vez, implica un consumo energético y, por otra parte, está limitada por las condiciones del producto y el calor latente de vaporización del agua a esa temperatura t . Obviamente, interesa que RCE_t sea lo más próximo a 1 posible, midiéndose así el grado de eficacia del secadero.

Finalmente, el balance térmico del proceso, por incluir las pérdidas energéticas previsibles, permite completar el cómputo energético real de un proceso propuesto en el que se ha de basar un sistema de secado, una formulación sencilla de este balance térmico se estableció en el epígrafe anterior, al hacer referencia al cálculo del secadero.

Posibilidades de mejora energética de los secaderos: Reconversión de procesos.

Las mejoras energéticas en secaderos pueden resumirse en:

- a) Reducción de pérdidas de calor en paredes o por transmisión a los elementos constructivos del secadero; eliminación de fugas de calor, vapor, etc. Esto se relaciona estrechamente con la construcción del secadero (aislamiento, elección de materiales y equipo, etc.) y con el control de los procesos de secado.
- b) Operaciones de recuperación de energía. Ya sea aplicando nuevas fuentes energéticas, más baratas o asequibles, a ciertas fases del proceso de secado, o bien recuperando energías perdidas o mal empleadas, en el propio proceso de secado. Sobre estas posibilidades se efectuará más adelante un más amplio comentario.
- c) Modificación del modo de secado, buscando sistemas de mayor economía energética. Así, podría recomendarse pasar del secado por arrastre al secado por ebullición ya que éste no precisa calentamiento de aire (que supone sobre el 30% del consumo de energía). Sin embargo, numerosas razones relativas a condiciones impuestas por el producto, pueden dificultar esta modificación. También se incluyen aquí las posibilidades del secado por liofilización que deben estudiarse con sumo cuidado pues, salvo que se disponga de sofisticados procedimientos de recuperación, pueden entrañar fuertes consumos energéticos.

- d) Modificaciones de las condiciones de funcionamiento del secadero (reconversión de procesos). Se basan en muchos de los principios analizados en puntos anteriores:
- Utilizar un aire de secado lo más cálido posible.
 - Saturar al máximo posible el aire de salida.
 - Reciclar en el secadero una parte del aire saliente, lo que permite recuperar la energía del aire húmedo, en vez de enviarla a la atmósfera. Así este aire húmedo y cálido se podría usar para precalentamiento del aire o del producto (sí éste lo admite) o en operaciones de preparación previa.
 - Recuperar el calor sensible del producto caliente.
 - Utilización del aire atmosférico para operaciones de presecado.
 - Reutilizar el aire saliente de una sección del secadero en la otra, previa división del secadero en secciones, combinando corrientes paralelas y/o contracorrientes.
 - Utilizar múltiples vías de calentamiento del aire.
 - Empleo de gases de caldera o afines (gas natural o propano) para el funcionamiento del secadero, evitando otras energías más caras o inasequibles.
 - Utilización de los gases de escape de máquinas térmicas (motores de explosión o turbinas de gas) como gases de secado en alguna fase de precalentamiento, si el secadero o el producto la admiten.
 - Implantación de bombas de calor en determinadas fases del proceso. Se hará referencia expresa de estas posibilidades más adelante.
- e) Secar lo menos posible. Esto conlleva, por un lado, la definición de auténticas políticas industriales (y agrícolas, pues ha de recordarse la gran incidencia del secado de productos agroalimentarios en el conjunto energético total de este proceso), en especial en lo relativo a planteamientos logísticos. Por otro lado, caben otras posibilidades más concretas para "secar menos" habida cuenta de que el secado es un proceso muy costoso, de forma que si una parte de este proceso se hace por otra vía, hay serias posibilidades de ahorro energético. Cabe

pensar en estas posibilidades, a título de ejemplo:

- Evitar humedecer el producto antes del secado (p.e.: lavados innecesarios).
 - Efectuar recolecciones de productos lo más secos posibles.
 - Reemplazar, para algunos productos, ciertas fases del proceso de secado por procesos de deshidratación simple en los que se empleen aportes energéticos menos costosos (energía mecánica, etc.) o, en el caso de líquidos, potenciar los procesos de evaporación.
 - Aplicar sistemas industriales sustitutivos del secado. A ellos también se hará referencia más adelante.
- f) Aplicación de fuentes energéticas sustitutivas de menor coste (energía solar, electricidad, radiación, etc.).

Recuperación de energía. Intercambio de calor.

La recuperación de energía residual es una de las más interesantes posibilidades de mejora energética de los procesos de secado. Esta recuperación puede tener dentro o fuera del propio secadero:

- a) Recuperación de energía en el secadero. Se basa en la mejora de la economía de calor de una instalación de secado recuperando, por intercambio, el calor contenido en el aire de evacuación.
- b) Recuperación de energía fuera del secadero. Su objeto es aprovechar múltiples fuentes energéticas gratuitas. Capaces de aportar energía de baja temperatura, anexas a gran cantidad de instalaciones industriales. Cabe situar algunas posibilidades:
 - Empleo de energía solar (requiere grandes inversiones).
 - Utilización de gases de combustión de calderas (propano, gas natural) como aire cálido (los productos alimenticios no aceptarían este tratamiento).

- Utilización de los escapes de máquinas o instalaciones térmicas (motores de explosión o turbinas de gas) como gas de secado.
- Uso del aire atmosférico en alguna fase del secado.
- Uso del reciclado del aire húmedo y cálido, en operaciones anexas (calentamiento de agua, descongelación, evaporación, etc.).

La Bomba de Calor.

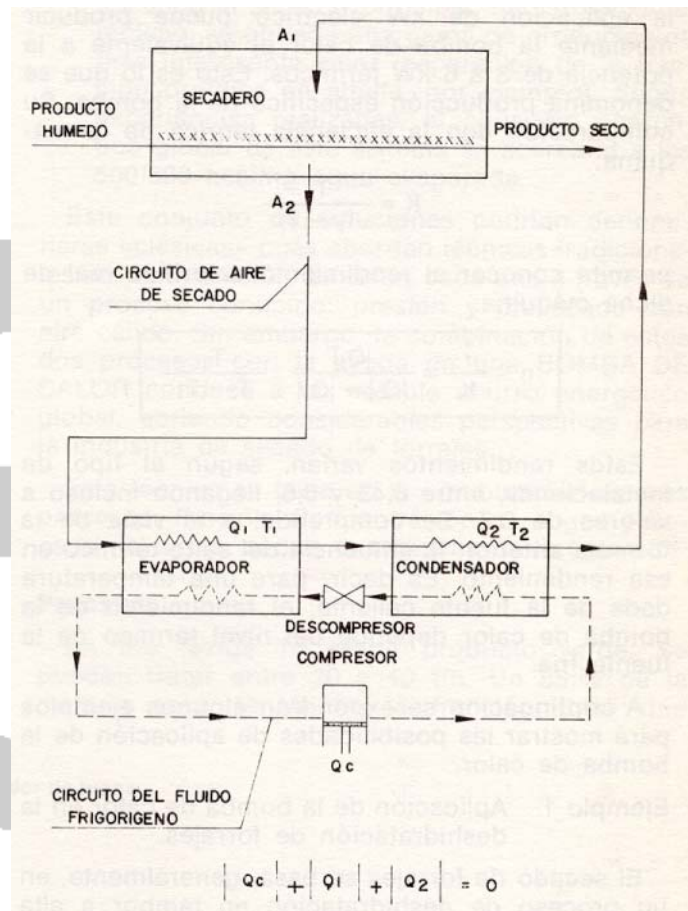
La bomba de calor encuentra un amplio campo para su utilización en aquellos procesos, como el secado, en los que el nivel térmico requerido no es muy elevado.

Así, se comienza a extender, con éxito, su aplicación en las siguientes operaciones industriales:

- En la industria de la madera, donde permite importantes ahorro energéticos.
- En el secado de cueros y pieles.
- En charcutería industrial, por la presencia inevitable de numerosos grupos frigoríficos.
- En la industria del papel.
- En operaciones de concentración y evaporación, en industrias agroalimentarias.
- Acompañado a procesos de evaporación por compresión mecánica, en industrias agroalimentarias (deshidratación y secado de granos y forrejes).
- En la industria química, mejorando los consumos energéticos con la compresión mecánica de vapor aplicada a los evaporadores.
- En destilerías o industrias extractivas mediante disolventes.

Las bombas de calor más utilizadas son las denominadas indirectas (Figura 21) que trabajan sobre un ciclo termodinámico básico (evaporación, condensación, descompresión) poniendo en juego un fluido frigorígeno halogenado. Su posible aplicación industrial depende, como se ha dicho, del nivel de temperatura y de la potencia calorífica que pueda obtenerse con ellas.

Figura 21.- Aplicación de la Bomba de Calor en el Proceso de Secado



En la Figura 21 se representa este circuito, según el sistema de bomba de calor indirecto, en conexión con un secadero. Es una forma de utilización de la máquina térmica descrita. En el caso del secado en que se trata de potenciar la fuente caliente, encuentra máxima aplicación la bomba de calor. Sin embargo, si lo que se pretendiese fuera potenciar la fuente fría, se trataría de una simple instalación frigorífica.

En este esquema, el balance energético viene dado por la fórmula siguiente:

$$|Q_c| = |Q_2| - |Q_1|$$

La energía mecánica del compensador Q_c compensa la transferencia de calor del proceso: $|Q_2| - |Q_1|$. Si esta energía suministrada por fuentes energéticas de bajo coste, compensa económicamente, se habrá logrado una interesante alternativa de sustitución energética.

En las bombas de calor, es decir, cuando se explota la fuente caliente, la eficacia viene dada por la relación:

$$r = \frac{|Q_2|}{|Q_2| - |Q_1|}$$

Esta eficacia en bombas de calor aplicadas al calentamiento de locales, varía de 3 a 6. Es decir, la aplicación de kw eléctrico puede producir mediante la bomba de calor el equivalente a la potencia de 3 a 6 kW térmicos. Esto es lo que se denomina producción específica de la bomba. Su comparación con la eficiencia teórica de la máquina;

$$K = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

permite conocer el rendimiento calorífico real de dicha máquina:

$$\eta = \frac{r}{K} = \frac{\frac{|Q_2|}{|Q_2| - |Q_1|}}{\frac{T_2}{T_2 - T_1}}$$

Estos rendimientos varían según el tipo de instalación, entre 0,45 y 0,6, llegando incluso a valores de 0,7. Se comprende a la vista de la fórmula anterior, la influencia del salto térmico en ese rendimiento. Es decir, para una temperatura dada de la fuente caliente, el rendimiento de la bomba de calor depende del nivel térmico de la fuente fría.

Alternativas al proceso de secado.

En el planteamiento de las posibilidades de mejora energética del proceso de secado se establecía como una de las vías a tener en cuenta la de "secar lo menor posible". Esto implica aprovechar al máximo las alternativas al propio proceso de secado. Las más importantes de ellas se basan en los principios de separación sobre membranas.

Estos principios se refieren fundamentalmente a la separación por ultrafiltración, por ósmosis inversa y por electrodiálisis que son los que han encontrado mayor número de aplicaciones industriales, aun cuando hay otras muchas posibilidades en vías de desarrollo.

Los tratamientos de separación por membranas tienen por objeto separar moléculas o iones, no partículas, aun cuando estos sistemas también pueden utilizarse para separar micropartículas o microorganismo. Se basa en la acción de membranas semipermeables, es decir, con diferente permeabilidad para diferentes especies químicas.

En ultrafiltración la membrana provoca un tamiz molecular, reteniendo moléculas gruesas y dejando pasar las pequeñas moléculas (p.e.: el agua). En la ósmosis inversa, por acción de una presión superior a la presión osmótica, se altera el equilibrio osmótico y se origina un proceso al revés que conlleva la pérdida de, líquido por la solución. En electrodiálisis se dispone de espacios separados por membranas permeables a ciertos cationes y/o aniones; por acción de un campo eléctrico se produce una migración controlada de los mismo.

Se trata de técnicas en las que se sustituye el consumo de energía térmica o de reactivos químicos por la aplicación de energía eléctrica.

El control energético en el proceso de secado.

Finalmente hay que hacer una rápida mención al control energético en el proceso de secado como las vías de máximo interés como alternativa de ahorro energético.

Sólo una eficaz tarea de control puede asegurar, por una parte, la continua identificación de desfases tecnológicos en los procesos de secado, causantes de dispendios energéticos y, por otra parte, una constante inquietud por la

localización e implantación de innovaciones tecnológicas que permitan la mejora energética de estos procesos.

Esta tarea de control debe basarse en la implicación total de los criterios energéticos en los planteamientos de planificación y programación de las actividades industriales que utilizan estos procesos de secado. Los proyectos de inversión y los programas de ingeniería precisan incluir este concepto de control energético como mecanismo que garantiza la selección de una óptima estrategia energética en esos proyectos y programas.

Finalmente, la propia actividad empresarial debe crear el concepto de control de energía relativo a productos, procesos sistemas de control de calidad, control de inventarios o control de recursos humanos.

En definitiva, una eficaz gestión energética debe ser uno de los estándares que midan una eficaz gestión empresarial. Esto supone establecer el criterio del control habida cuenta de los principios y conclusiones establecidos a lo largo de este trabajo, en donde se señala la existencia de numerosas posibilidades de ahorro energético y mejoras tecnológicas de las estrategias energéticas de los procesos de secado.



Intercambio de Calor

eoi

Introducción

Genéricamente, el intercambio de calor implica el paso de energía calorífica de un fluido a otro a través de una pared sólida que los separa. La operación puede realizarse con o sin cambio de fase en alguno de los fluidos, transmitiéndose de calor latente, sensible o ambos.

El tratamiento cuantitativo de las operaciones de intercambio de calor se basa, fundamentalmente, en la aplicación de los balances caloríficos y el concepto de intensidad de paso del calor.

El balance calorífico de un intercambio expresa que la cantidad de calor cedido por el fluido que se enfría y/o condensa ha de ser igual a la que gana en el mismo tiempo el fluido que se calienta y/o evapora y representa, pues, el calor total a intercambiar en el aparato en dicho tiempo. El balance anterior sería rigurosamente cierto sólo en el caso ideal de que las pérdidas al exterior fuesen nulas; habitualmente, en la práctica se procura reducir dichas pérdidas a un valor muy pequeño, utilizando para ello un aislante adecuado. Despreciando, pues, estas pérdidas y suponiendo estado estacionario, régimen en el que operan la mayor parte de los intercambiadores, el balance de calor adopta la siguiente forma:

$$m_c (h_{c1} - h_{c2}) = m_f (h_{f2} - h_{f1}) = Q$$

Donde m_c y m_f representan los caudales máscicos de los fluidos caliente y frío respectivamente (kg/h), h_c y h_f sus correspondientes entalpías (kcal/kg) a la entrada (1) y a la salida (2) y Q es que caudal de calor intercambiado por ambos fluidos (kcal/h).

Por otra parte, el caudal de calor que pasa a través de un elemento diferencial de superficie de intercambio, da , puede expresarse mediante la ecuación:

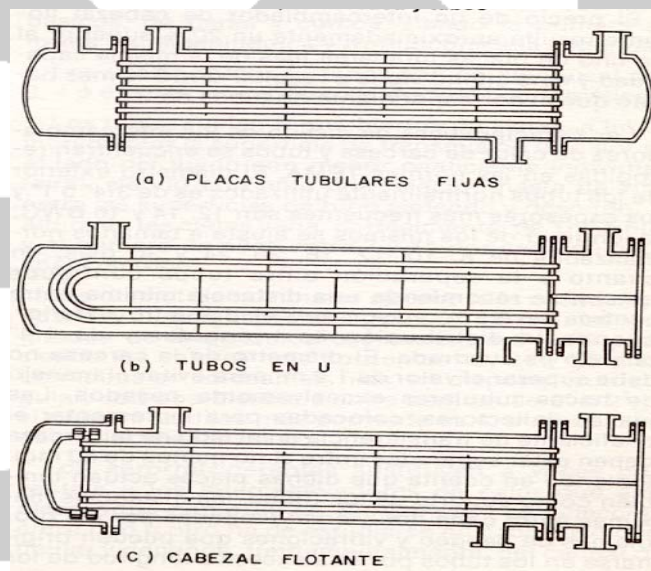
$$dQ = U \, dA \, \Delta T$$

Donde Δt representa la diferencia local de temperatura entre los fluidos caliente y frío en el elemento diferencial considerado y constituye la fuerza impulsora del proceso, mientras que el producto $U \cdot dA$ corresponde al inverso de la resistencia térmica. La magnitud U recibe el nombre de coeficiente global de transferencia de calor y tiene las unidades de kcal/h m^2 °C, si Q se expresa en kcal/h, A en m^2 y Δt en °C.

Tipos de Intercambiadores.

En su sentido más amplio, un intercambiador de calor es cualquier dispositivo en el que se verifica una transferencia calorífica entre dos fluidos separados por una pared. Es evidente que el número de aplicaciones de un intercambiador de calor es muy elevado, dado que cualquiera de los fluidos puede ser líquido, gas o vapor y la operación puede llevarse a cabo con o sin cambio de fases; es por ello por lo que se suele aplicar el término intercambiador en un sentido más limitado a aquellos aparatos utilizados para el enfriamiento y calentamiento de fluidos, empleándose denominaciones más específicas para aquellos otros en los que el intercambio de calor se realiza con cambio de fase en uno de los fluidos: condensadores si se produce una condensación por enfriamiento y evaporadores si tiene lugar la formación de vapor por calentamiento.

Figura 22.- Tipos Básicos de Intercambiadores de Calor



En una primera clasificación pueden distinguirse dos grandes grupos de intercambiadores:

- Tubulares, que pueden ser de doble tubo o de carcasa y tubos; estos últimos son, sin duda, los más utilizados en plantas de procesos.

- No tubulares, entre los que pueden citarse los intercambiadores de placas, los de tipo espiral, los de celdas o láminas, los de bloques de grafito y los de aerorrefrigerantes, aunque estos últimos son en realidad intercambiadores tubulares que carecen de carcasa envolvente. Se incluirán en este apartado los regeneradores de calor, constituidos por lechos de material cerámico que almacena el calor del fluido caliente durante el ciclo de calentamiento para cederlo al fluido frío en la etapa de enfriamiento del lecho; es evidente que en este caso la separación entre los dos fluidos no se debe a la existencia de una pared a tal efecto, sino al funcionamiento alternativo del lecho como almacén y fuente de calor en etapas diferentes.

Intercambiadores Tubulares.

El tipo más sencillo es el de doble tubo, constituido por dos tubos concéntricos por el interior de cada uno de los cuales circula uno de los fluidos, transmitiéndose el calor de uno al otro a través de la pared del tubo interior.

Los intercambiadores de uso más frecuente son los de carcasa y tubos, constituidos por un haz tubular rodeado por una carcasa o envolvente. Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos y el otro por el exterior de los mismos, a través del espacio comprendido entre éstos y la pared interior de la carcasa. Con este diseño se consigue, desde luego, una superficie de transferencia muy superior a la que puede lograrse con un intercambiador de doble tubo del mismo tamaño.

El modelo de placas tubulares fijas presenta la ventaja fundamental de su sencillez y facilidad de construcción, que se traduce, evidentemente en un menor precio. Su inconveniente principal reside en que las placas tubulares fijas impiden la dilatación del haz y la limpieza de la carcasa y de la pared exterior de los tubos por medios mecánicos sencillos.

Los intercambios de tubos en U pueden construirse de haz tubular desmontable o fijo. Son de fácil construcción y bajo coste y permiten trabajar en condiciones de presión y temperatura elevadas. Sin embargo, el radio de curvatura de los tubos obliga a la utilización de una carcasa de mayor diámetro para el mismo número de ellos y no resulta posible de limpiar mecánicamente el interior de los mismos.

Finalmente, los intercambiadores de cabezal flotante no presenta problemas en cuanto expansión térmica y la limpieza, tanto exterior como interior, de los resulta fácil. Sin embargo, presenta ciertas restricciones en relación con la presión de operación, no resultan aconsejable para fluido inflamables o tóxicos y su coste resulta superior al de los tipos anteriormente citados.

El precio de un intercambiador de cabezal flotante resulta aproximadamente un 20% superior al de uno de placas tubulares fijas de la misma capacidad y este último viene a resultar un 10% más barato que el correspondiente de tubos en U.

Intercambiadores no Tubulares.

Pueden citarse, entre otros los de placas, los de tipo espiral, los láminas o celdas, los de bosques de grafito, los aerorrefrigerantes y los regeneradores de calor. Más adelante, en el apartado dedicado a las tendencias futuras en relación con el intercambio de calor, se describen otros sistemas interesantes.

Los aparatos del primer grupo consisten en una serie de placas corrugadas de material metálico, separadas por un espacio estrecho, entre las que circulan los fluidos que intercambian calor. Las placas se fabrican en chapa muy fina, a base de materiales resistentes a la corrosión, formando un paquete y comprimidas por varios tornillos o por uno solo central en los intercambiadores de apertura rápida; el fluido a través del sistema se canaliza mediante una adecuada disposición de estas puede variarse mediante sencillas operaciones de montaje y desmontaje, lo que permiten una gran flexibilidad operativa; del mismo modo, la adición de placas especiales de conexión permiten introducir nuevos fluidos de forma que pueden calentarse y enfriarse varios simultáneamente en la misma unidad. Otra ventaja importante de este tipo de intercambiadores es la ausencia casi total de soldaduras.

Las placas se separan entre sí mediante juntas, para las que se emplean materiales diversos (caucho sintético, amianto, etc.); estas juntas constituyen el elemento débil del intercambiador de placas desde el punto de vista mecánico, quedando limitado su campo de aplicación a presiones máximas de unas 20 atmósferas y temperaturas próximas a 250°C; sin embargo, gracias a ellas, los intercambiadores de placas son aparatos de una gran seguridad, ya que cuando la presión sobrepasa el límite de resistencia, se abren y actúan como válvulas de seguridad.

Otra importante ventaja de estos aparatos deriva de que la circulación de los fluidos a través de ellos es prácticamente en contracorriente pura, lo que permite alcanzar diferencias muy pequeñas entre la temperatura de entrada del fluido caliente y la de salida del fluido frío, es decir, elevados rendimientos en la recuperación de calor.

Las características constructivas de este tipo de intercambiadores se traducen en valores de los coeficientes de transferencia de calor muy superiores a los correspondientes a intercambiadores tubulares. Estos, unido a su capacidad, supone una importante reducción del espacio necesario para una misma capacidad de intercambio.

Por otra parte, la elevada turbulencia del flujo en los intercambiadores de calor de placas, se traduce en una reducción del ensuciamiento (el factor de ensuciamiento resulta hasta 10 veces menor que en los tubulares). Además, la limpieza suele ser una operación muy sencilla.

En cuanto al coste de estos aparatos, puede decirse que, en general, un intercambiador de placas resulta ligeramente más caro que el correspondiente de carcasa y tubos cuando éste se construye en acero al carbono, pero bastante más barato si el material de construcción del segundo es algún metal o aleación resistente a las corrosión (ha de tenerse en cuenta que los intercambiadores de placas se fabrican siempre basándose en materiales anticorrosivos).

Actualmente puede decirse que aproximadamente un 20% de los procesos de intercambio calorífico dentro de la industria química se realiza mediante intercambiadores de placas. En la industria alimentaria el porcentaje es muy superior. Se construye modelos con capacidad para más de 1.000 t/h de fluido y 3 mm kcal/h.

- Los intercambiadores de tipo espiral están formados por dos láminas de chapa metálica, provista de espárragos distanciadores, enrolladas formando un cuerpo cilíndrico cuya sección transversal tiene la forma de un canal doble en espiral. Son de diseño sencillo y se utilizan para presiones de hasta unos 15 kg/cm² y temperatura de 400°C.
- Los de láminas o celdas están formados por dos láminas de chapa metálica, provista de espárragos distanciadores, enrolladas formando un cuerpo cilíndrico cuya sección transversal tiene la forma de un canal doble en espiral. Son de diseño sencillo y se utiliza para presiones de hasta unos 15kg/cm² y temperaturas de 400°C.

- Los de láminas o celdas están formados por canales tubulares aplanados, unidos formando un haz de sección circular, encerrado en una envolvente cilíndrica. Su rango de utilización es mayor que el de los anteriores, pudiendo llegar hasta presiones de unos 35kg/cm² y temperaturas de 600°C
- Los intercambiadores de bloques de grafito son aparatos construidos a base de cuerpos cilíndricos compactos de grafito, cuyo interior está ocupado por dos haces de tubos perpendiculares. Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos longitudinales y el otro lo hace a través de los radiales, recorriendo los diversos elementos, que se encuentran separados mediante tabiques deflectores, también de grafito; la disposición de los diferentes módulos permite variar a voluntad las condiciones de funcionamiento. En este tipo de aparatos pueden alcanzarse coeficientes de transferencia de calor elevados, se utilizan para presiones máximas de unos 15 kg/cm² y se construye en módulos de hasta 100 m² de superficie de intercambio.
- Los aerorrefrigerantes son aparatos formados por haces paralelepípedicos de tubos por cuyo interior circula el fluido a enfriar y por cuya parte externa se hace circular aire, impulsado o aspirado mediante ventiladores, en dirección perpendicular al haz. Si los haces tubulares están colocados por encima de los ventiladores, recibiendo el aire impulsado por ellos, el aerorrefrigerante se denomina de tiro forzado y en el caso contrario, de tiro inducido.

Los regeneradores de calor consisten, normalmente, en lechos de material cerámico capaces de acumular el calor transferido al mismo por un gas que lo atraviesa a temperatura elevada y cederlo posteriormente a otro de nivel térmico inferior que se haga pasar a través de él. Estos sistemas pueden actuar también como acumuladores de frío; es el caso de los regeneradores Frantl, ya citados, en los que el material de relleno está constituido por una cinta de aluminio enrollada. En un generador de calor no existe pared sólida alguna que separe a los fluidos frío y caliente, sino que ambos circulan a través del lecho en etapas diferentes. El funcionamiento de un sistema de este tipo en régimen continuo exige la instalación de, al menos, dos lechos separados que funcionen alternativamente, de modo que cuando el primero es atravesado por el gas caliente, por el segundo pasa el frío, invirtiéndose el ciclo después de un período de tiempo determinado. La principal ventaja de estos aparatos radica en su sencillez constructiva y bajo este coste inicial y de funcionamiento, siendo su inconveniente más importante, la dificultad de mantener un nivel térmico regular en el efluente durante un cierto intervalo. Su utilización más frecuente se presenta en la recuperación de calor de corriente gaseosas con un nivel térmico más bien elevado.

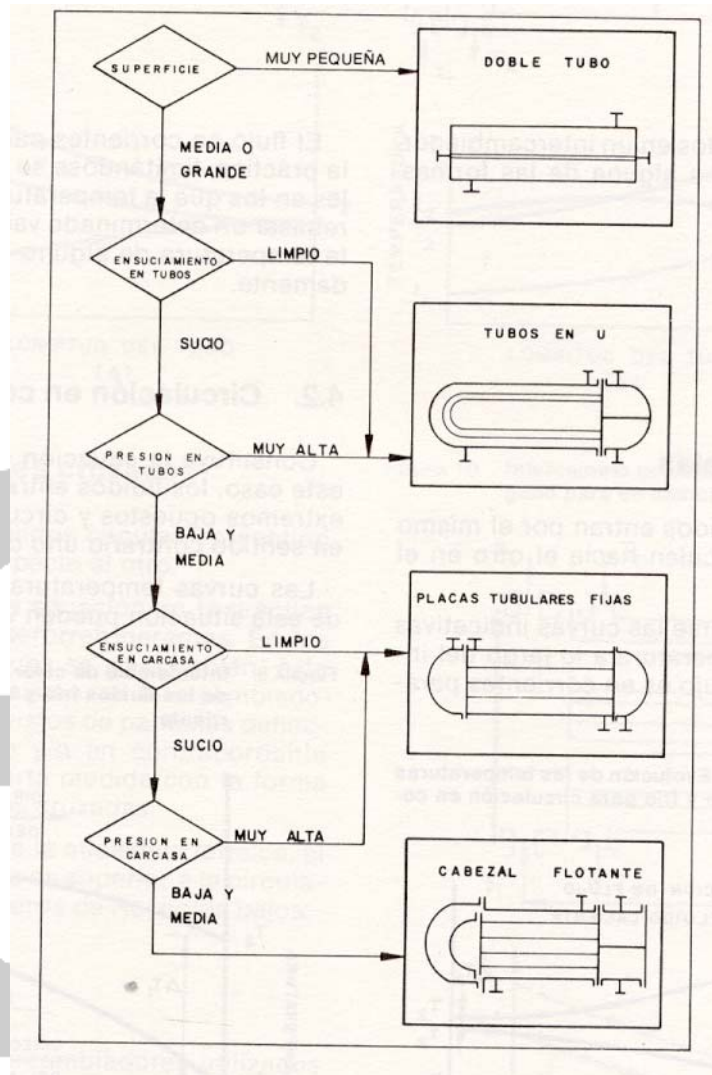
Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 121 de 130

Selección del tipo de Intercambiador.

La selección del tipo de intercambiador a utilizar en cada caso, exige el análisis de factores tales como la naturaleza y propiedades físicas de los fluidos implicados en el proceso, los caudales de los mismos y el grado de recuperación del calor deseado, las condiciones de operación y de flujo, presión, temperatura y velocidad. Los citados factores determinan el valor del coeficiente global de transferencia, la cantidad de calor a intercambiar por unidad de tiempo, el área de intercambio necesaria, el grado de ensuciamiento permisible, la pérdida de carga y la energía de bombeo necesaria, los materiales de construcción a utilizar, estanqueidad y resistencia mecánica requeridas, dilatación térmica, juntas y materiales para las mismas, etc., consideraciones en base a las cuales debe elegirse el aparato aquel que resultando compatible con las condiciones operativas suponga un coste anual más bajo, considerando todas las partidas del mismo, amortización, mantenimiento y funcionamiento.

En relación con los intercambiadores de carcasa y tubos, la Figura 23, recoge, de forma esquemática, un proceso lógico de selección, que utiliza como criterios básicos, el tamaño de la superficie de intercambio, el grado de ensuciamiento previsible y la presión de operación. Una superficie se considera pequeña por debajo de 10- 15 m², un factor de ensuciamiento es bajo cuando adquiere valores no superiores a 0,0002 h. m² °C/kcal y por encima de 70kg/cm² la presión se considera alta.

Figura 23.- Selección de Intercambiadores de Carcasa y Tubos



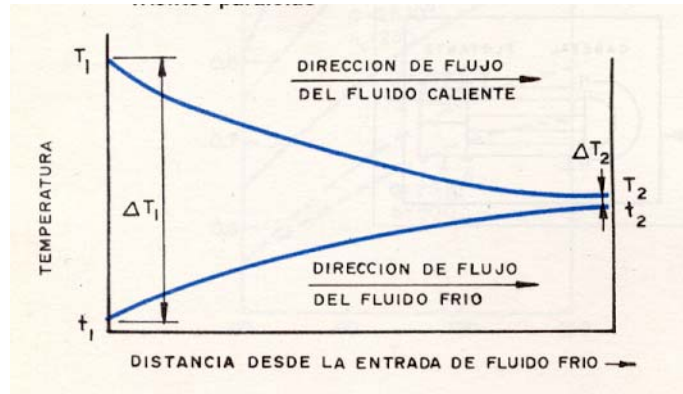
Forma de Trabajo.

Corrientes Paralelas

En este caso los fluidos entran por el mismo extremo del aparato y circulan hacia el otro en el mismo sentido.

En la Figura 24 pueden verse las curvas indicativas de la evolución de la temperatura a lo largo del intercambiador cuando el flujo es en corrientes paralelas.

Figura 24.- Intercambio de Calor en Corrientes Paralelas



Con esta forma de circulación no resulta posible para la temperatura de salida de uno de los fluidos un valor próximo a la de entrada del otro; en efecto, con una superficie de intercambio infinita el fluido podría calentarse, como límite, hasta una temperatura igual a la que resultaría de su mezcla con el caliente en el extremo inicial del intercambiador. Por otra parte, el caudal del calor intercambiado es menor que en el caso de circulación contracorriente, dado que en los extremos finales del intercambiador la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos se hace muy pequeña.

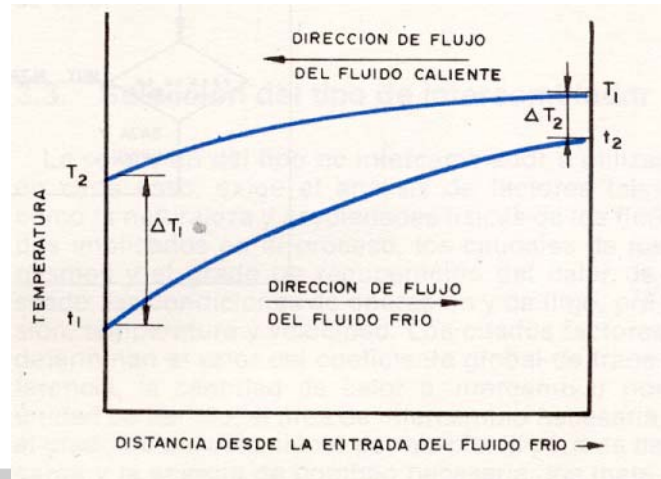
El flujo en corrientes paralelas se utiliza poco en la práctica, limitándose su empleo a casos especiales en los que la temperatura de fluido frío no debe rebasar un determinado valor o cuando interesa que la temperatura de alguno de los fluidos varíe rápidamente.

Circulación en Contracorriente

Constituye la situación opuesta a la anterior. En este caso, los fluidos entran y salen del aparato por extremos opuestos y circulan a lo largo del mismo en sentido contrario uno con respecto al otro.

La curvas temperatura-longitud representativas de esta situación pueden verse en la Figura 25.

Figura 25.- Intercambio de Calor en Contracorriente



Con el flujo en contracorriente puede obtenerse una temperatura de salida para el fluido frío próxima a la de entrada del fluido caliente; en el límite, para una superficie de transferencia infinita, serían ambas iguales. El flujo en contracorriente supone, pues, una mayor eficiencia de la operación de intercambio calorífico, definida ésta como relación entre el salto térmico real que experimenta el fluido frío y el máximo posible o diferencia entre las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos.

Flujo en Corrientes Cruzadas

En este caso, los dos fluidos circulan en sentido perpendicular uno con respecto a otro.

El ejemplo típico de esta situación en la práctica es el constituido por los aerorrefrigerantes. En los intercambiadores de bloques se da, también, esta forma de circulación. Asimismo, en intercambiadores de carcasa y tubos provistos de pantallas deflectoras, el flujo en paralelo y/o en contracorriente, aparece combinado en cierta medida con la forma de circulación en corrientes cruzadas.

Desde el punto de vista de la eficiencia térmica, el flujo en corrientes cruzadas es superior a la circulación en paralelo.

Circulación Mixta

Autor/a: *Jesús Pedro García Montes/Colaboradora: Leidy Báez Capellán* Página 125 de 130

En algunos tipo de intercambiadores utilizados en la práctica industrial, la circulación de los dos fluidos responde a una combinación de todas o algunas de las tres formas antes citadas. Tal es, por ejemplo, el caso de los aparatos de carcasa y tubos con más de un paso por los tubos y uno o varios por la carcasa. Con un intercambio de paso múltiple puede lograrse velocidades de flujo superiores, lo que se traduce en valores más altos del coeficiente de transferencia, aunque las pérdidas por fricción aumentan. En las Figuras 26 y 27 pueden verse las gráficas temperatura- longitud en intercambiadores 1-2 y 2-4, respectivamente.

Figura 26.- Intercambio de Calor. Curvas Temperatura-Longitud para Cambiadores 1-2

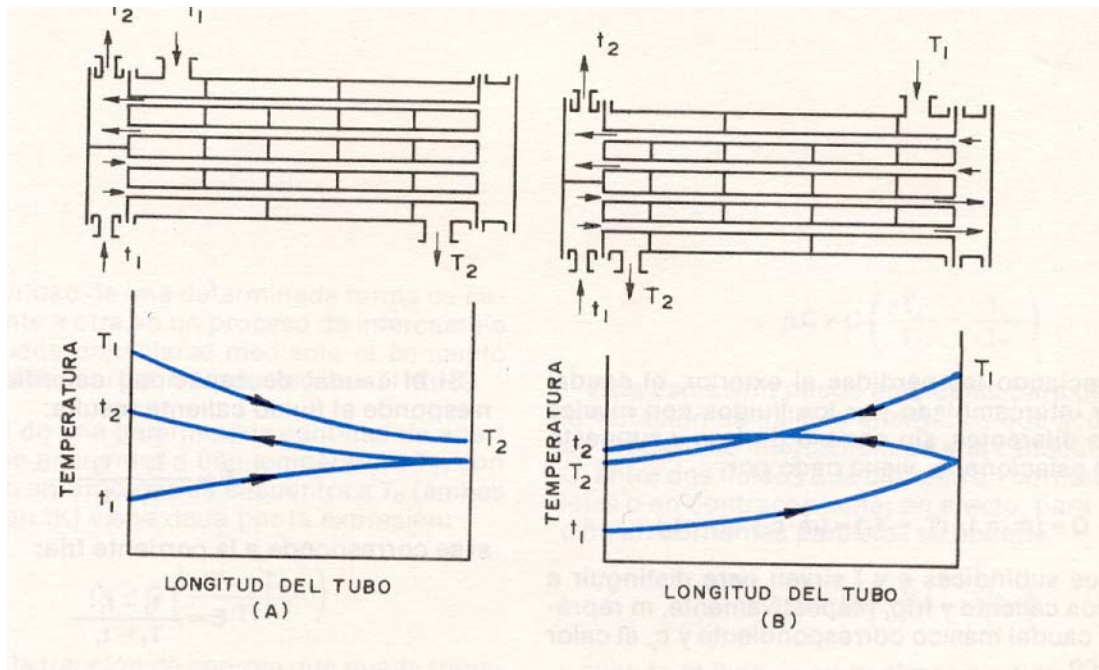
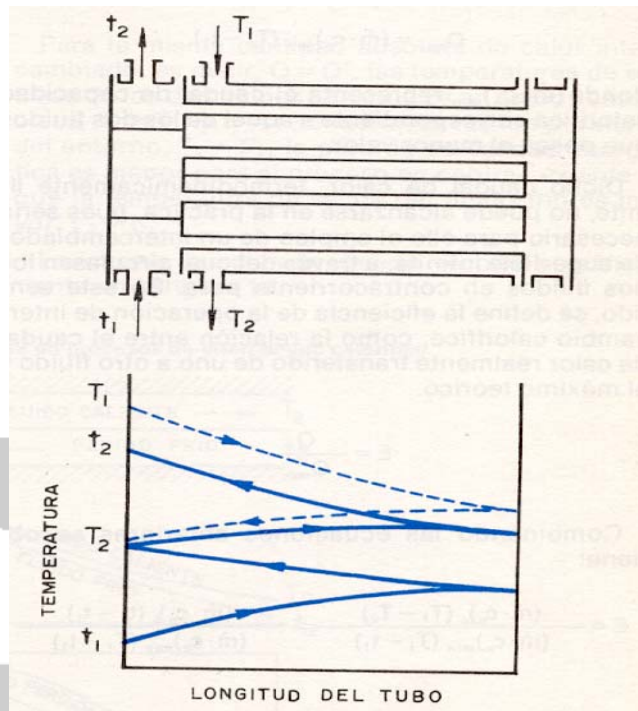


Figura 27.- Intercambio de Calor. Curvas Temperatura-Longitud para un Cambiador 2-4



Eficiencia Térmica

Despreciando las pérdidas al exterior, el caudal de calor intercambiado por los fluidos con niveles térmicos diferentes, sin cambio de fase y supuesto un régimen estacionario, viene dado por:

$$Q = (m * cp)_c * (T1 - T2) = (m * cp)_f * (t2 - t1)$$

donde los subíndices c y f sirven para distinguir a los fluidos caliente y frío, respectivamente, m representa el caudal másico correspondiente y cp el calor específico.

El producto m*cp corresponde en cada caso al caudal de la capacidad calorífica. El caudal de calor máximo teóricamente transferible viene dado por:

$$Q_{max} = (m * cp)_{min} * (T1 - t1)$$

donde $(M \cdot c_p)_{\min}$ representa el caudal de capacidad calorífica correspondiente a aquel de los dos fluidos que posea el menor valor.

Dicho caudal de vapor, termodinámicamente límite, no puede alcanzarse en la práctica, pues sería necesario para ello el empleo de un intercambiador de superficie infinita, a través del cual circularían los dos fluidos en contracorriente pura. En este sentido, se define la eficiencia de la operación de intercambio calorífico, como la relación entre el caudal de calor realmente transferido de uno a otro fluido y el máximo teórico.

$$E = \frac{Q}{Q_{\max}}$$

Si el caudal de capacidad calorífica menor corresponde al fluido caliente resulta:

$$E = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$$

si se corresponde a la corriente fría:

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Calidad de la Energía

La superioridad de una determinada forma de circulación frente a otra en un proceso de intercambio calorífico puede enjuiciarse mediante el concepto de calidad de energía.

La calidad de una determinada cantidad de energía, Q , que se encuentra a una temperatura T_1 , con respecto a su entorno que se encuentra a T_0 (ambas expresadas en $^{\circ}\text{K}$) viene dada por la expresión:

$$C_1 = Q \left(\frac{T_1 - T_0}{T_1} \right)$$

y representa la fracción de energía que puede transformarse en trabajo en un sistema reversible.

Así pues, cuando se transfiere una cantidad de calor, Q , desde un cuerpo que se encuentra a la temperatura T_1 a otro que queda a T_2 , la calidad de dicha energía será:

$$C_2 = Q \left(\frac{T_2 - T_0}{T_2} \right)$$

suponiendo la misma temperatura, T_0 , para el entorno.

La pérdida de calidad experimentada vendrá dada por:

$$\Delta C = Q \left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

Esta expresión puede emplearse para determinar la variación de calidad energética que acompaña a un proceso de intercambio de una cantidad de calor Q entre dos fluidos que circulan en corrientes paralelas o en contracorriente.

Para la misma cantidad absoluta de calor intercambiado, las temperaturas de entrada de los dos fluidos son iguales en ambos casos, e idénticas las temperaturas del entorno. La pérdida de calidad energética es menor para el proceso en contracorriente ya que la temperatura de salida del fluido frío es mayor (Figura 28).

Figura 28.- Variación de la Calidad de Energía en Procesos de Intercambio Calorífico

