

# **OPERACIONES UNITARIAS**

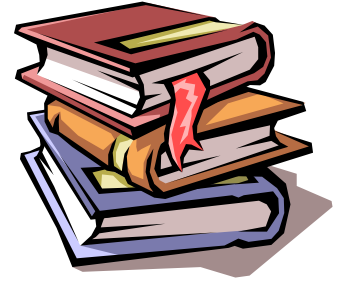
**2023**



***UT5 EVAPORACION***

# BIBLIOGRAFIA

---



- **Apuntes de la cátedra de Operaciones Unitarias.**
- **Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Mc.Cabe-Smith Harriot.**
- **Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Pedro J. Martínez de la Cuesta.**

# ***EVAPORACION***

---

## **OPERACIÓN DE CONCENTRACION DE UNA DISOLUCION POR EBULLICION Y SEPARACION DEL DISOLVENTE.**

### **PARA LA INDUSTRIA TRES FINES PRINCIPALES:**

- CONCENTRACION PREVIA DE UN LIQUIDO ANTES DE OPERAR CON EL, (EJEMPLO; SECADO POR ATOMIZACION, CRISTALIZACION).**
- DISMINUCION DEL VOLUMEN DEL LIQUIDO PARA REDUCIR COSTOS DE ALMACENAMIENTO, EMBALAJE Y TRANSPORTE, (EJEMPLO; MOSTO CONCENTRADO).**
- AUMENTAR LA CONCENTRACION DE LOS SOLIDOS SOLUBLES DE LOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS PARA FACILITAR SU PRESERVACION, (EJEMPLO; LECHE CONDENSADA EDULCORADA, EXTRACTO DE TOMATE).**

# ***EVAPORACION***

---

## **EVAPORADORES** **QUIMICOS**

En este caso interesa aumentar la concentración de un soluto de una solución por extracción del solvente sin afectar significativamente las propiedades del soluto

# ***EVAPORACION***

---

## **EVAPORADORES DE PLANTA DE FUERZA**

En este caso interesa es generar vapor y no importa afectar al soluto

# EVAPORACION

---

## CONCLUSIONES

En los evaporadores de **planta de fuerza**, la porción no evaporada del alimento es el residuo, mientras que en los evaporadores **químicos** es el producto

Elevación del punto de ebullición (E.P.E): los evaporadores **químicos** son capaces de altas eficiencias térmicas e incapaces de una alta utilización de los potenciales térmicos, y requieren grandes superficies debido a que las soluciones acuosas concentradas tienen un E.P.E

Propiedades del fluido: en **planta de fuerza**, el proceso del agua se modifica para que no cause espuma y otras dificultades. En evaporadores **químicos**, el residuo es el producto deseado y no se pueden hacer ajustes para prevenir la espuma o incrustaciones.

# ***EVAPORACION***

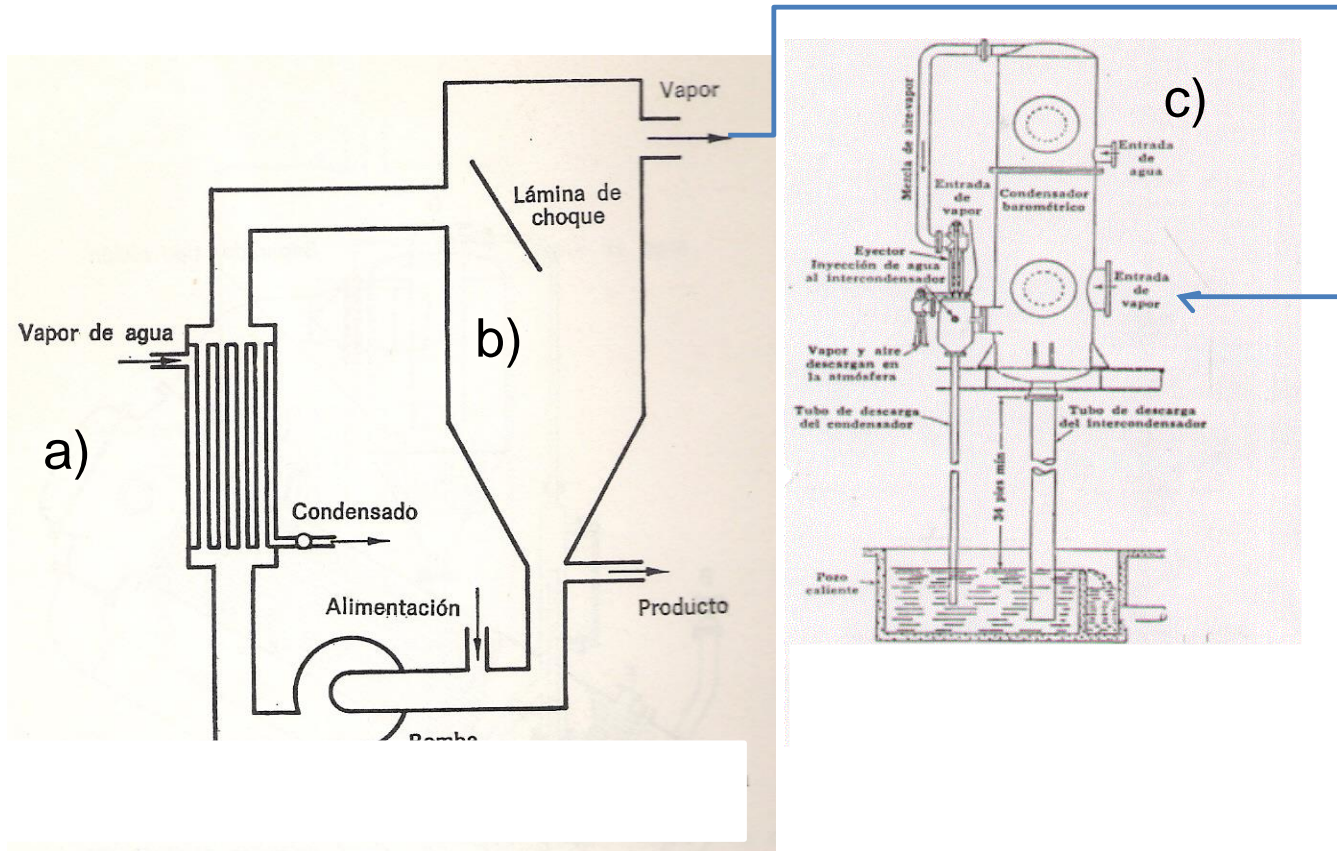
---

- **LA EVAPORACION ∴ UNA EBULLICION.**
- **SUBCAPA GASEOSA EN CONTACTO CON LA FASE LIQUIDA EN LA INTERFASE LIQ. – VAPOR, ES VAPOR GENERADO.**
- **∴ NO HAY RESISTENCIA A LA TRASFERENCIA DE MATERIA EN LA FASE GASEOSA.**
- **∴ LA OPERACIÓN ESTA CONTROLADA POR LA VELOCIDAD DE TRASFERENCIA DE [Q].**

# EVAPORACION

## COMPONENTES BASICOS DE UN EVAPORADOR

- a) INTERCAMBIADOR DE CALOR: suministra  $Q_s$  y  $Q_{lat}$ , ( vapor de H<sub>2</sub>O saturado)
- b) SEPARADOR: donde se separa el vapor de la fase liquida concentrada
- c) CONDENSADOR: condensación del vapor y su separación





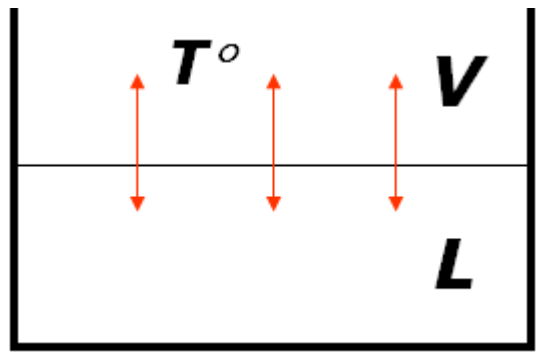
# EVAPORACION

**FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE EL PUNTO DE EBULLICION DE LOS LIQUIDOS**

**FUERZA MOTRIZ =  $\Delta T$  ENTRE EL MEDIO CALEFACTOR Y EL LIQUIDO A CONCENTRAR**

**LA T° DEL LIQUIDO A EVAPORAR ES INFLUENCIADO:**

1- **PRESION EXTERNA:** un liquido hierva cuando la presión de vapor que ejerce se hace igual a la presión externa a la que esta sometido, se busca la relación (T°, Pv) del disolvente.



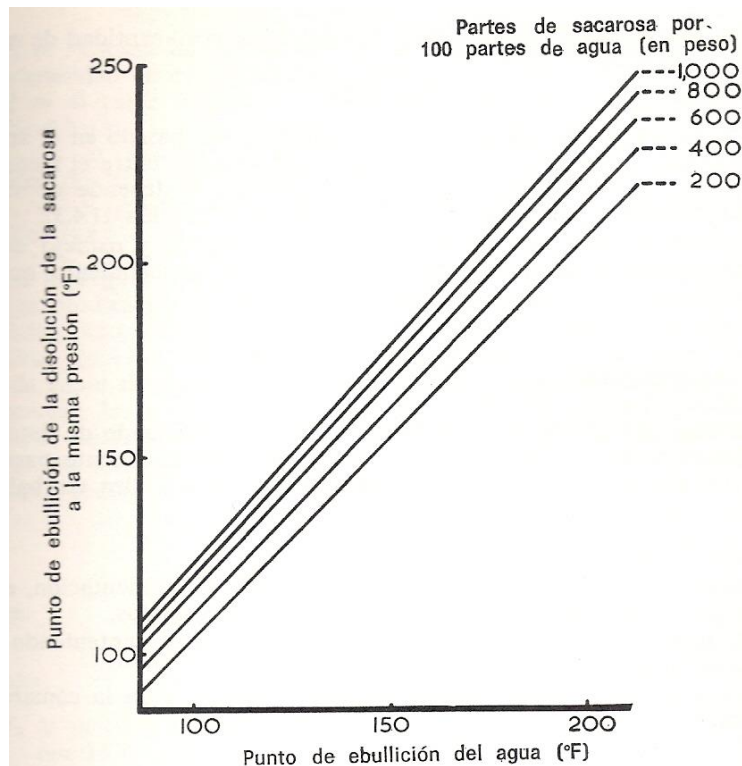
$$P = P_v$$

# EVAPORACION

## FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE EL PUNTO DE EBULLICION DE LOS LIQUIDOS

**FUERZA MOTRIZ =  $\Delta T$  ENTRE EL MEDIO CALEFACTOR Y EL LIQUIDO A CONCENTRAR**

**LA T° DEL LIQUIDO A EVAPORAR ES INFLUENCIADO:**



**2- ELEVACION DEL PUNTO DE EBULLICION DEBIDO AL SOLUTO DISUELTO (E.P.E):** el punto de ebullición de una disolución es mayor que el del disolvente puro a la misma presión, (grafico de Dühring).

FIG. 11.1. Gráfica de Dühring para disoluciones acuosas de sacarosa (tomada de datos de Honig<sup>1</sup>).

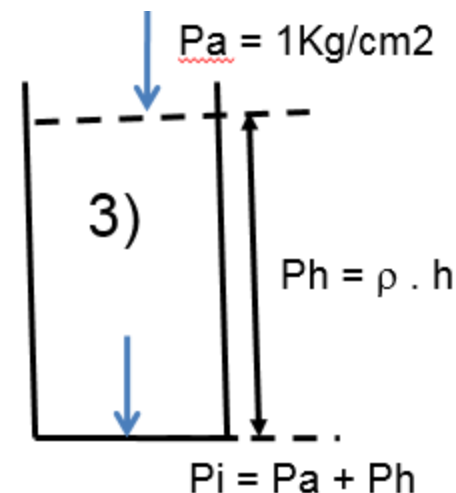
# EVAPORACION

## FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE EL PUNTO DE EBULLICION DE LOS LIQUIDOS

FUERZA MOTRIZ =  $\Delta T$  ENTRE EL MEDIO CALEFACTOR Y EL LIQUIDO A CONCENTRAR

LA T° DEL LIQUIDO A EVAPORAR ES INFLUENCIADO:

3- **ALTURA HIDROSTATICA:** el liquido del nivel inferior al de la superficie libre esta sometido a una presión igual a la suma de la presión sobre la superficie y la presión de la altura hidráulica del liquido., (reduce la  $\Delta T$  entre el medio de calefacción y el liquido hirviente, puede sobre calefaccionarse el liquido de proceso, recalentándolo).



# ***EVAPORACION***

---

## **LA CANTIDAD DE CALOR [Q]**

La velocidad global Q de transmisión de calor, desde el medio de calefacción al líquido en ebullición, a través de las paredes del evaporador y las películas que las recubren, se conoce normalmente por “cantidad de calor”

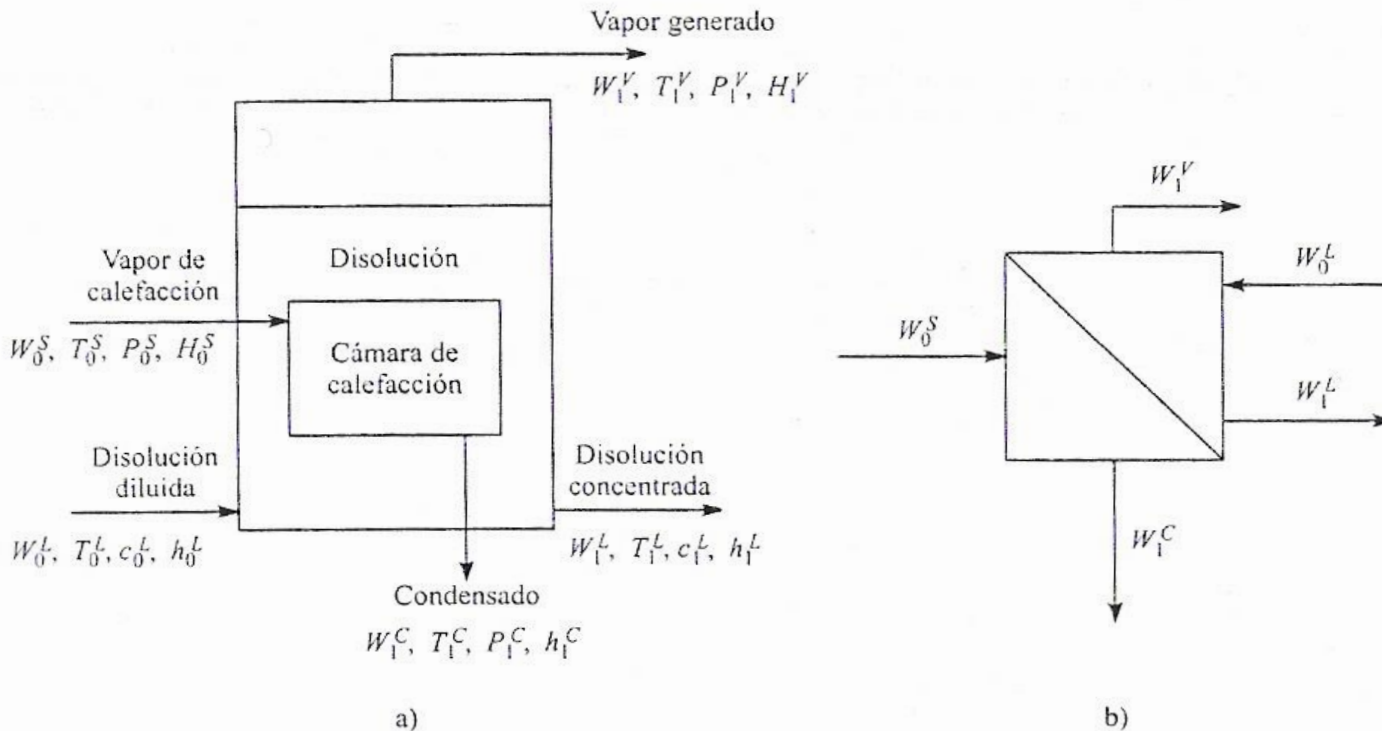
$$Q = U A \Delta T$$

U= Coeficiente Global de Transmisión de Calor

A = Área de transferencia interior o exterior

$\Delta T$  = Diferencia de T° entre el medio de calefacción y el líquido en ebullición

# EVAPORACION



Representación esquematizada de un evaporador: a) Esquema simplificado.  
b) Esquema simplificado simbólico.

## Subíndice

0 = Corriente entrante  
1 = Corriente saliente

## Superíndice

S = Vapor vivo  
C = Condensado  
V = Vapor generado  
L = Corriente líquida

**W** = Caudal de la corriente

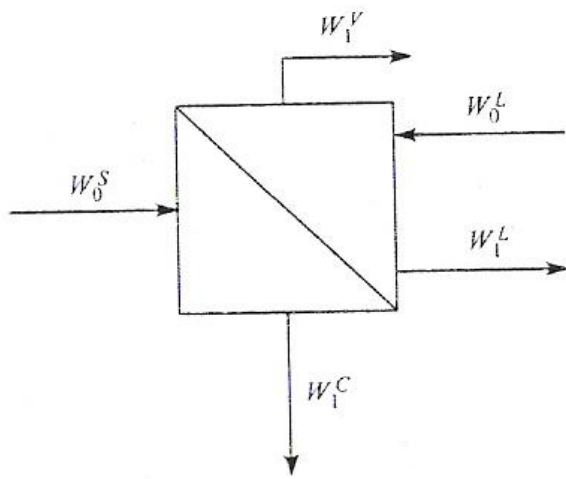
**P** = Presión

**T** = Temperatura

**c** = Concentración

**H** = Entalpia corriente gaseosa por unidad de masa

**h** = Entalpia corriente líquida por unidad de masa



# EVAPORACION

## Balances de materia y entalpico

∴ BALANCES DE MATERIA, DE ENTALPIA Y LA UTILIZACION DE  
 ∴ LA ECUACION DE TRANSMISION DEL CALOR.

Balance de material global:

$$W_0^L = W_1^L + W_1^V \quad ; \quad W_0^S + W_0^L = W_1^C + W_1^L + W_1^V$$

Balance de materia del componente volatil:

$$W_0^L c_0^L = W_1^L c_1^L + W_1^V$$

Balance de energia:

$$W_0^S H_0^S + W_0^L h_0^L = W_1^C h_1^C + W_1^L h_1^L + W_1^V H_1^V \quad W_0^S = W_1^C$$

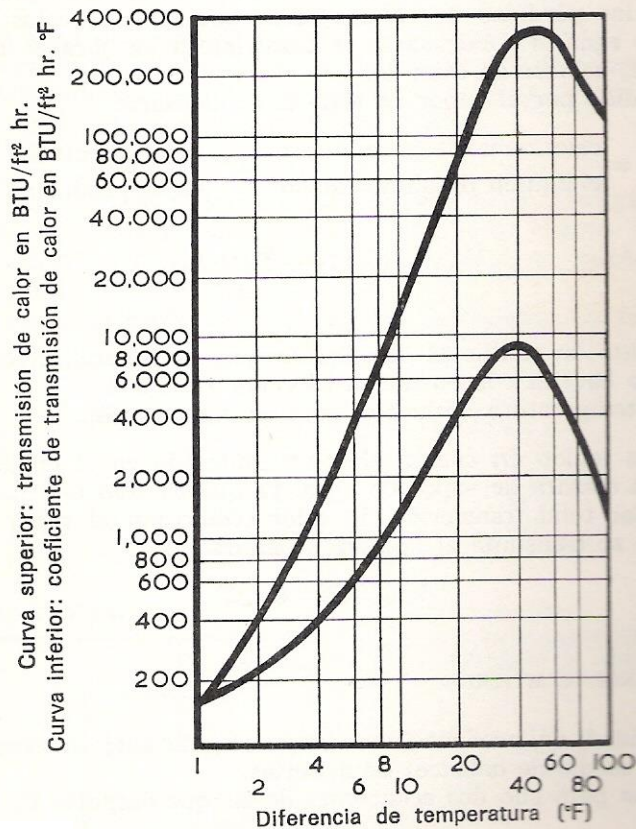
$$Q = W_0^S H_0^S - W_1^C h_1^C = W_0^S (H_0^S - h_1^C) = -W_0^L h_0^L + W_1^L h_1^L + W_1^V H_1^V$$

$$Q = U A \Delta T$$

Q = CALOR TRANSMITIDO A TRAVES DE LA SUP. DE CALEFACCION DEL EVAPORADOR.

# EVAPORACION

## FACTORES QUE REGULAN EL VALOR DE [U]



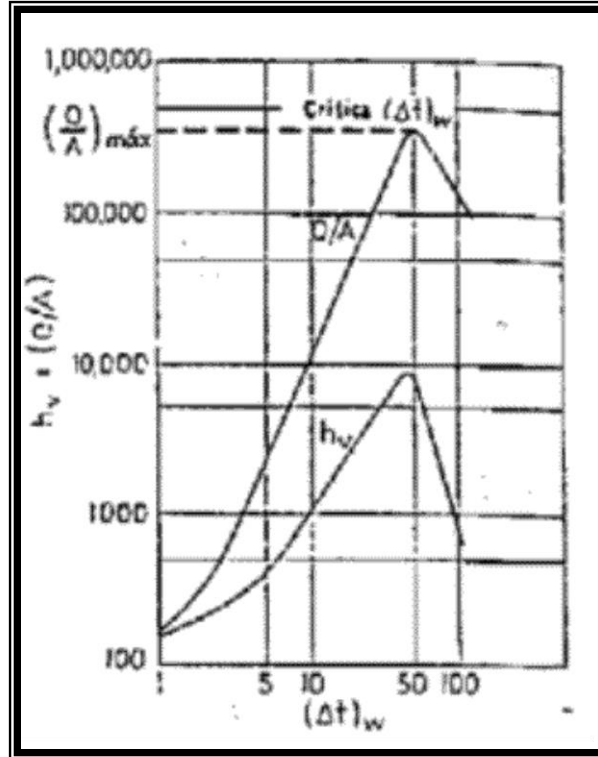
EL VALOR DE U PUEDE CALCULARSE:

- h del vapor condensante en el lado del vapor de H<sub>2</sub>O del cambiador de calor.
- h de la película del líquido en el lado del líquido del cambiador de calor.
- Los Factores de suciedad de las paredes int. y ext. que limitan las sup. de transmisión del Q.
- La resistencia térmica del material de las paredes.

Flujo de calor y coeficiente de transmisión de calor del agua a ebullición 212° F (100° C) sobre superficies sumergidas. An Introduction to Heat Transfer de M. Fishenden y O. A. Saunders (Clarendon Press, Oxford, 1950).

N. del T. — Para transformar BTU/ft²hr en Kcal/m²hr multiplíquese el primero por 0,27 y para cambiar BTU/ft²hr °F en Kcal/m²hr °C multiplíquese por 4,88.

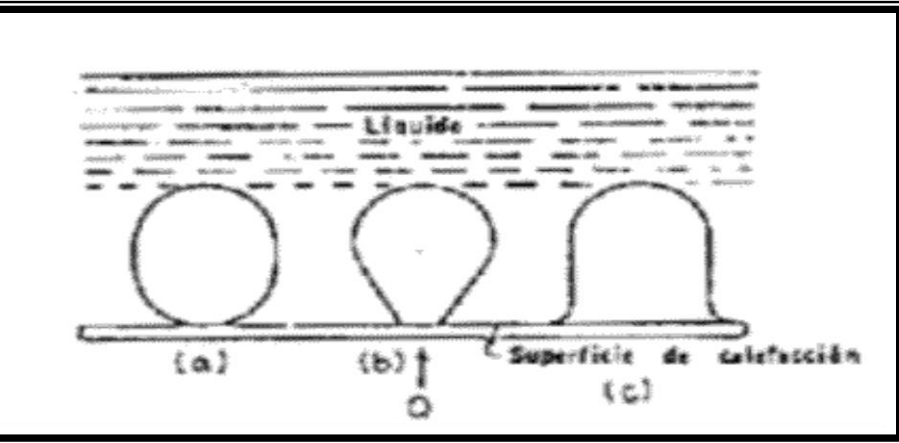
# EVAPORACION



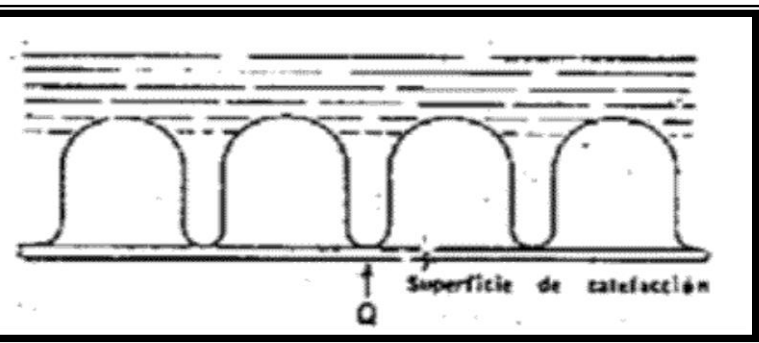
- $h$  vapor  $\text{H}_2\text{O} \cong 5.000\text{-}15.000 \text{ Kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
- $h$  circulación forzada  $>$   $h$  circulación natural
- veloc. circulación en evaporador circulación natural  $\cong 1\text{-}2 \text{ m/seg}$
- veloc. circulación en evaporador circulación forzada  $\cong 3\text{-}5 \text{ m/seg}$
- $h$  de películas de líquidos en ebullición dependen critica// de  $\Delta T$  entre la superficie de calefacción sumergida y el líquido en ebullición.
- A medida que aumenta  $\Delta T$  el  $Q/A$  crece.



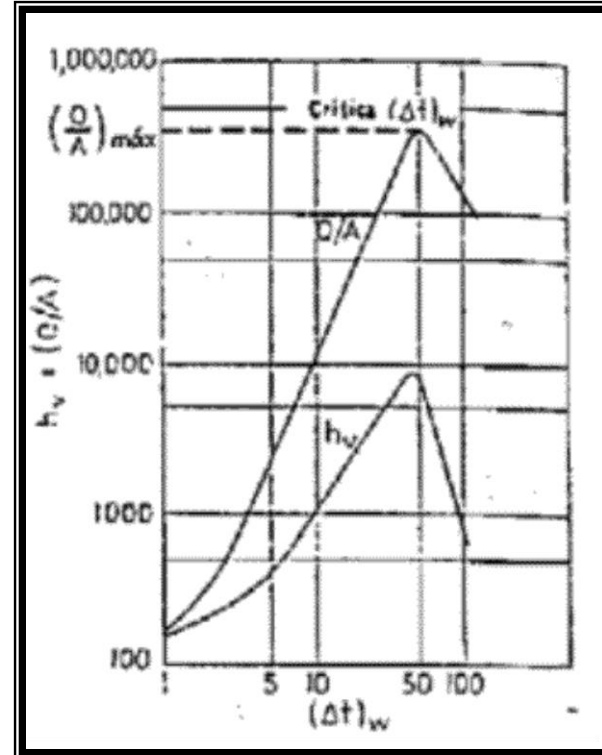
# EVAPORACION



Efecto de la tensión interfacial en la formación de las burbujas



Interferencia incipiente



Curva de ebullición de agua

Las grandes diferencias de temperatura que son tan favorables para la conducción y convección, puede ser un impedimento para la vaporización.  $\Delta T$  critico= 25-30 °C U difícil de calcular

EL INGENIERIO CONFIA MAS EN LA EXPERIENCIA

# ***EVAPORACION***

---

## **INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL LIQUIDO DE ALIMENTACION SOBRE LA EVAPORACION**

**INFLUYEN SOBRE LA ELECCION DEL TIPO DE EVAPORADOR PARA UNA DETERMINADA APLICACIÓN.**

**VISCOSIDAD:**  $> \mu$   $<$  veloc. de circulación y  $< U$  - a medida que aumenta la concentración, también la viscosidad, y disminuye  $U$ .

**SUCIEDAD-COSTRAS:** La deposición de costras sobre la sup. de transmisión de calor durante la evaporación disminuye  $U$ .

Se produce por depósito de los sólidos disueltos de la alimentación.

Se depositan al calentar la disolución.

A gran velocidad de la corriente líquida, menor ensuciamiento.

Se utiliza limpieza CIP, en la Industria.

# ***EVAPORACION***

---

## **INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL LIQUIDO DE ALIMENTACION SOBRE LA EVAPORACION**

**INFLUYEN SOBRE LA ELECCION DEL TIPO DE EVAPORADOR PARA UNA DETERMINADA APLICACIÓN.**

**ESPUMA:** Se presenta cuando la ebullición es a presión reducida y la altura hidrostática es grande.

Esta relacionado con las fuerzas interfaciales que se producen entre el vapor, el liquido recalentado y el solido suspendido que actúa como núcleos de formación de burbujas.

Para evitar la formación se utilizan agentes tensioactivos , o medios mecánicos (placa de ruptura, o separador centrifugo).

**RESISTENCIA A LA CORROSION:** Se debe considerar la naturaleza corrosiva de las sustancias utilizadas en el proceso.

Se utilizan materiales compatibles con las sustancias procesadas.

Para alimentos se utiliza acero inoxidable

Liquidos corrosivos se trabaja con flujo forzado, U grande, A menor.

# ***EVAPORACION***

---

## **INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL LIQUIDO DE ALIMENTACION SOBRE LA EVAPORACION**

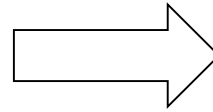
**INFLUYEN SOBRE LA ELECCION DEL TIPO DE EVAPORADOR PARA UNA DETERMINADA APLICACIÓN.**

**SENSIBILIDAD A LA T°:** Mantener bajas las T° de ebullición y tiempos de Residencia cortos. Se consigue reduciendo la P de trabajo del evaporador.

# EVAPORACION

## TRANSMISION DE CALOR

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$



$$\left\{ \begin{array}{l} Q = U_{ap} \cdot A \cdot \Delta T_{ap} \\ Q = U_c \cdot A \cdot \Delta T_c \end{array} \right.$$

**U = coeficiente global de transferencia de calor, (ap = aparente)  
(c = corregido)**

**U = f (material que forma la superficie de intercambio,  
coeficiente de condensación del vapor de calefacción, coef.  
de convección del líquido hirviente)**

$$\Delta T_{ap} = (t_{\text{vap condensante}} - t_{\text{líq hirviente}})$$

**E.P.E**

# EVAPORACION

## DATOS ENTALPICOS

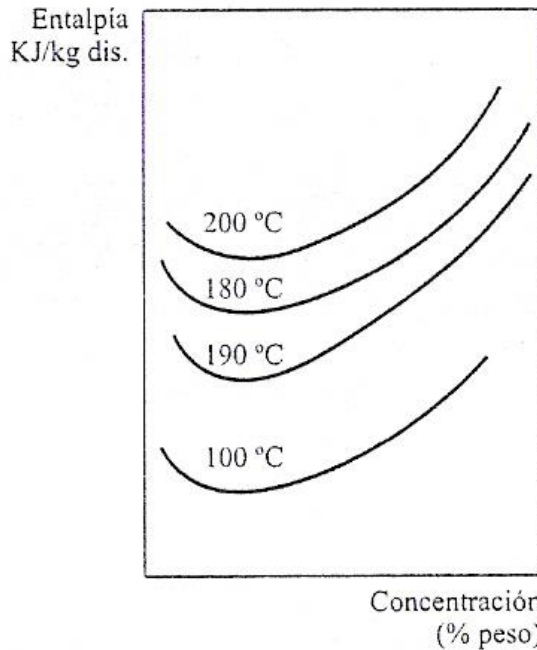


Diagrama entalpía-concentración para una disolución.

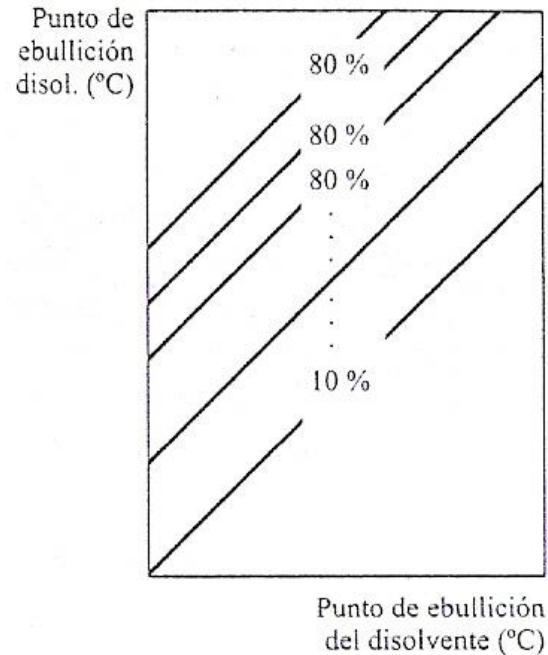


Diagrama de Dühring para una disolución.

$$r = 605,5 - 0,695 \cdot T$$

Ecuación de Regnault

r = Calor de cambio de estado liquido – vapor en [ kcal/kg ]

T = Temperatura en [°C]

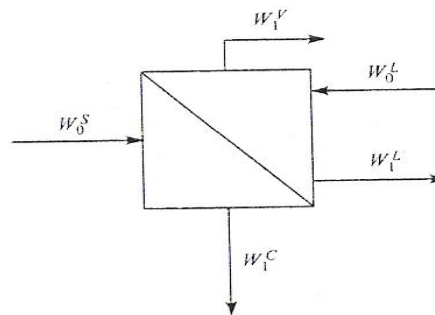
# EVAPORACION

## CARACTERISTICAS DE EVAPORADORES

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{kilogramo de disolvente evaporado}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{Economía} = \frac{\text{kilogramo de disolvente evaporado}}{\text{kilogramo de vapor de calefacción}}$$

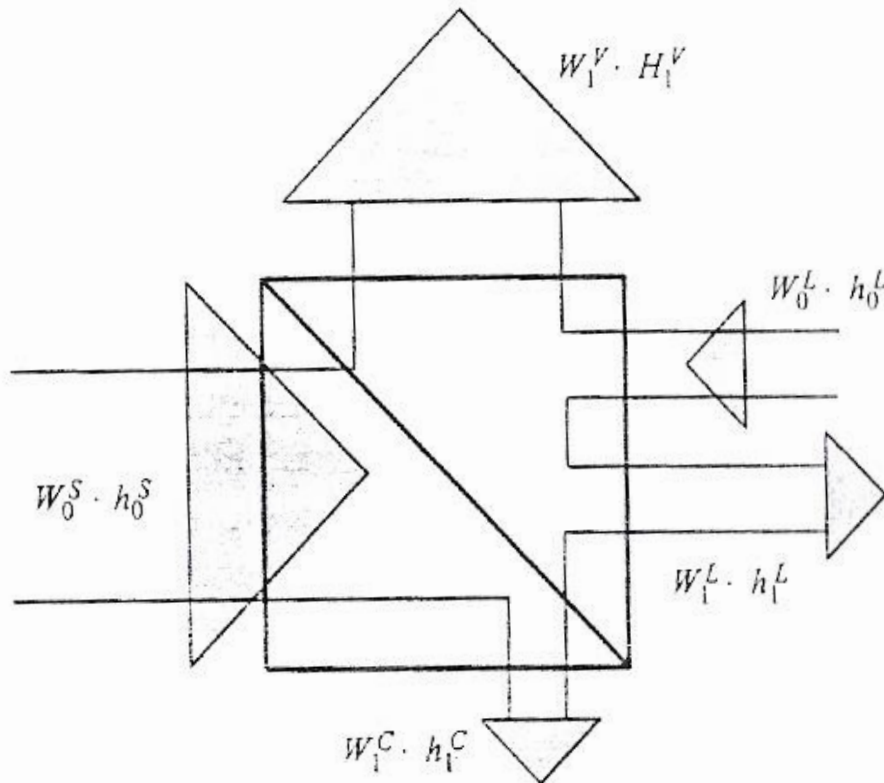
$$\text{Consumo de vapor de calefacción} = \frac{\text{capacidad}}{\text{economía}} = \frac{\text{kilogramo vapor de calefacción}}{\text{tiempo}}$$



# EVAPORACION

## RECUPERACION DE ENERGIA DE LOS VAPORES

$$W_0^S H_0^S \cong W_1^V H_1^V$$



### METODOS RECUPERACION Q

- Múltiples efectos
- Recompresión del vapor
- Uso fluido secundario de Q

Representación esquematizada de las corrientes entálpicas en un evaporador.

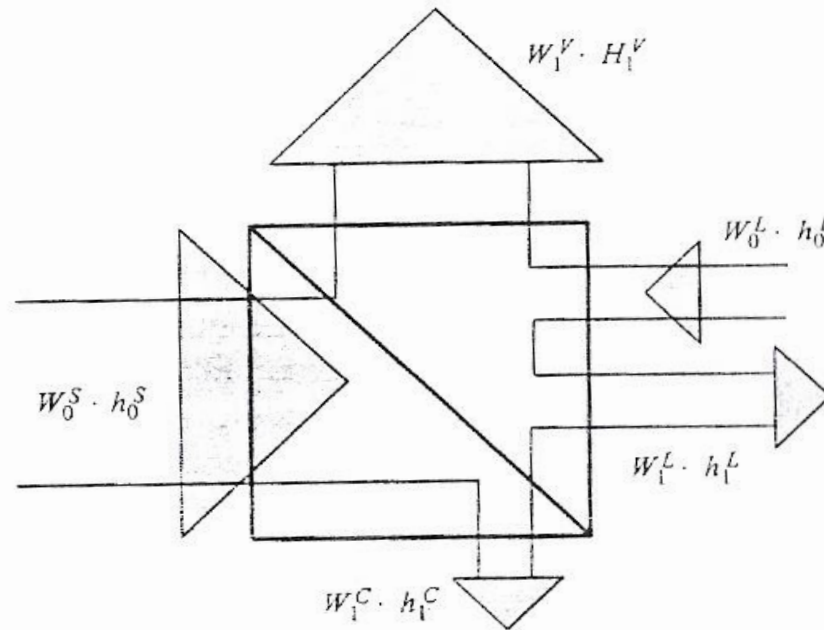


# EVAPORACION

## SISTEMAS DE MULTIPLE EFECTO

EL VAPOR GENERADO EN UN EFECTO SE UTILIZA COMO VAPOR DE CALEFACCION PARA EL SIGUIENTE EFECTO.

LA REUTILIZACION DE ESTE CALOR REDUCE LOS COSTOS DE PRODUCCION DE LA INSTALACION.

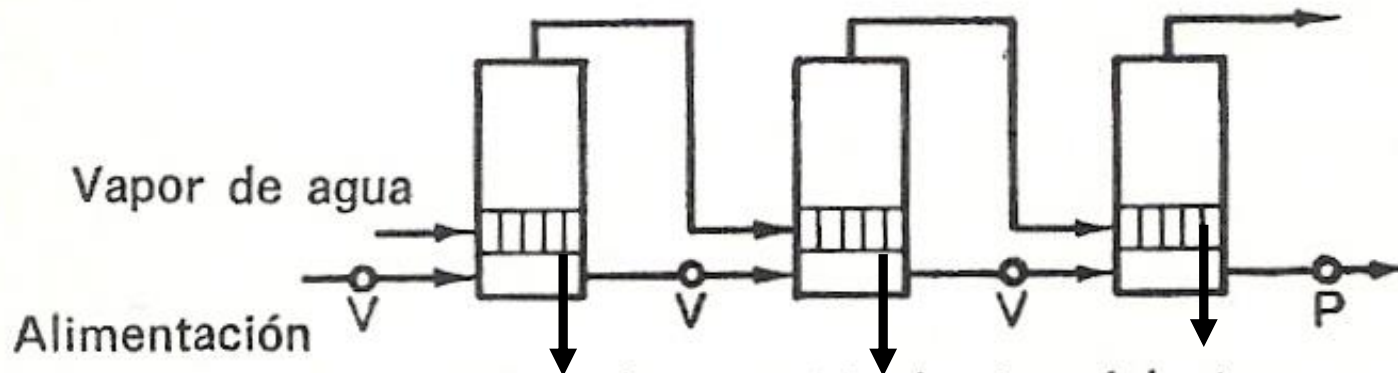


Representación esquematizada de las corrientes entálpicas en un evaporador.

# EVAPORACION

## SISTEMAS DE MULTIPLE EFECTO

EL VAPOR PRODUCIDO SE PUEDE UTILIZAR EN LA CALANDRIA DE UN 2DO EVAPORADOR, SIEMPRE QUE EL PUNTO DE EBULLICION DEL LIQUIDO EN ESTE EVAPORADOR SEA LO SUFICIENTEMENTE BAJO PARA MANTENER UN  $\Delta T$  ADECUADO.



V = Válvula de control    P = Bomba de extracción

# EVAPORACION

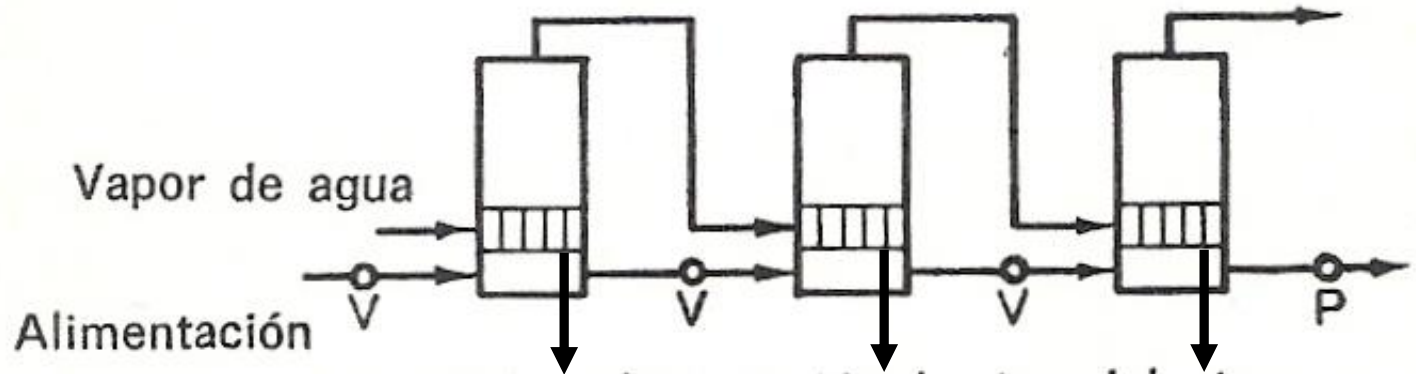
## SISTEMAS DE MULTIPLE EFECTO

SE PODRIA UTILIZAR UN N° CUALQUIERA DE EFECTOS PARA APROVECHAR EL [Q].

SE MUESTRA UN SISTEMA TRIPLE EFECTO.  $Capacidad = \frac{\text{kilogramo de disolvente evaporado}}{\text{tiempo}}$

**!!ATENCIÓN!!**,

- A IGUALDAD DE SUPERFICIE CON UN EVAPORADOR SENCILLO, NO TIENE UNA MAYOR PRODUCCION.
- MEJORA LA *ECONOMIA* GLOBAL, NO AUMENTA LA *CAPACIDAD* DE LA INSTALACION.



- 1 EFECTO** = 1,3 Kg DE VAPOR DE AGUA, PARA EVAPORAR 1 Kg DE AGUA
- 2 EFECTO** = 0,6 Kg DE VAPOR DE AGUA, PARA EVAPORAR 1 Kg DE AGUA
- 3 EFECTO** = 0,4 Kg DE VAPOR DE AGUA, PARA EVAPORAR 1 Kg DE AGUA

# ***EVAPORACION***



## SISTEMAS DE MULTIPLE EFECTO

**Clasificación de la alimentación según el sistema de circulación por el líquido a concentrar:**

**Alimentación directa**

**Alimentación en contracorriente**

**Alimentación en paralelo**

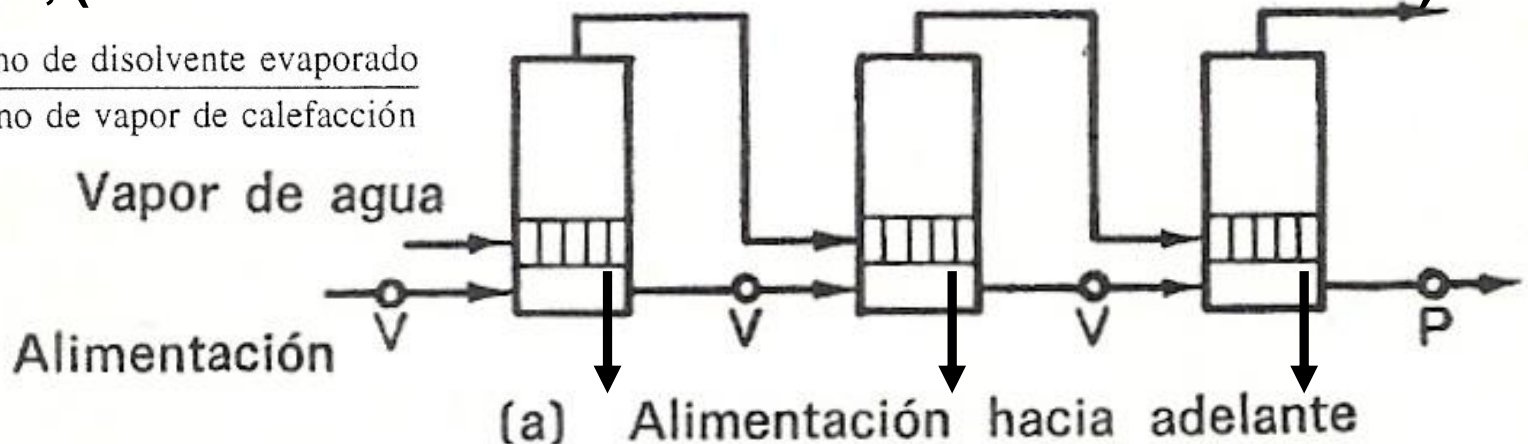
**Alimentación mixta**

# EVAPORACION

## ALIMENTACION DIRECTA O EN PARALELO

- METODO MAS SENCILLO.
- ALIMENTACION Y EL VAPOR DE CALEFACCION HACIA DELANTE.
- SOLO SE NECESITA UNA BOMBA DE EXTRACCION.
- EL ULTIMO EFECTO A PRESION REDUCIDA.
- LA VISCOSIDAD DE LA ALIMENTACION AUMENTA POR EL AUMENTO DE LA CONCENTRACION Y LA DISMINUCION DE LA T° EN CADA EFECTO.
- [U] DISMINUYE DEL PRIMERO AL ULTIMO EFECTO.
- DISMINUYE EL DETERIORO DE PRODUCTOS TERMO SENSIBLES.
- ALIMENTACION EN SU PUNTO DE EBULLICION OPTIMIZA LA OPERACIÓN, (PERDIDA DE LA ECONOMIA DEL VAPOR DE AGUA).

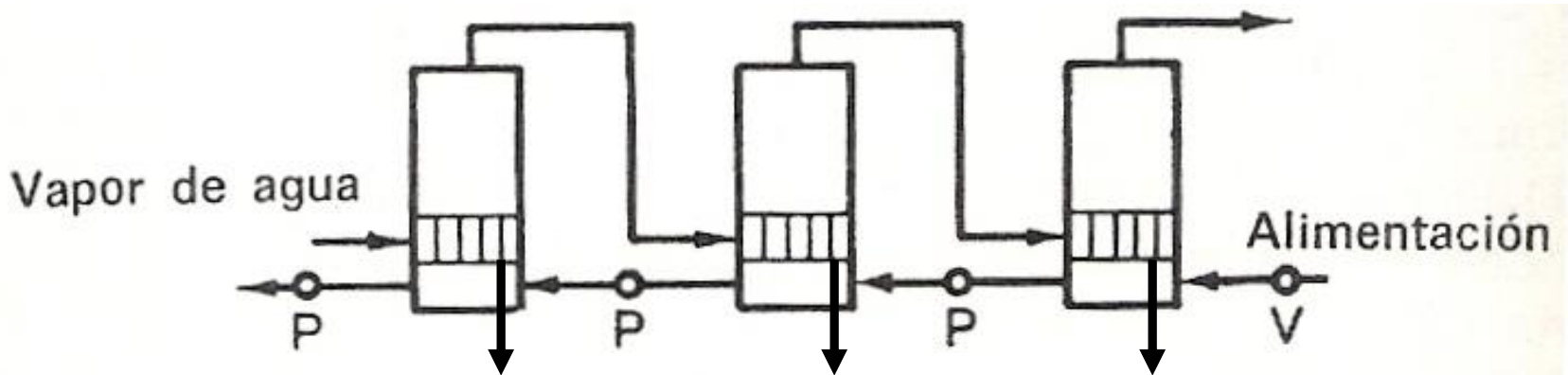
$$\text{Economía} = \frac{\text{kilogramo de disolvente evaporado}}{\text{kilogramo de vapor de calefacción}}$$



# EVAPORACION

## ALIMENTACION EN CONTRACORRIENTE

- LA ALIMENTACION Y EL VAPOR DE AGUA FLUYEN EN CONTRACORRIENTE.
- SE DEBE COLOCAR BOMBAS ENTRE LOS EFECTOS.
- ALIMENTACION MAS FRIA Y DILUIDA SE ENCUENTRA CON EL VAPOR DE AGUA DE PEOR CALIDAD, ( MAS FRIO).
- MEJORA LA *ECONOMIA* DEL VAPOR DE AGUA.
- EL AUMENTO DE LA VISCOSIDAD POR LA CONCENTRACION, SE COMPENSA CON EL AUMENTO DE LA T° EN LOS EFECTOS, AL ENCONTRARSE LA ALIMENTACION CON SUPERFICIES CADA VEZ, MAS CALIENTES, ( EVITAR RECALENTAMIENTO LOCAL).

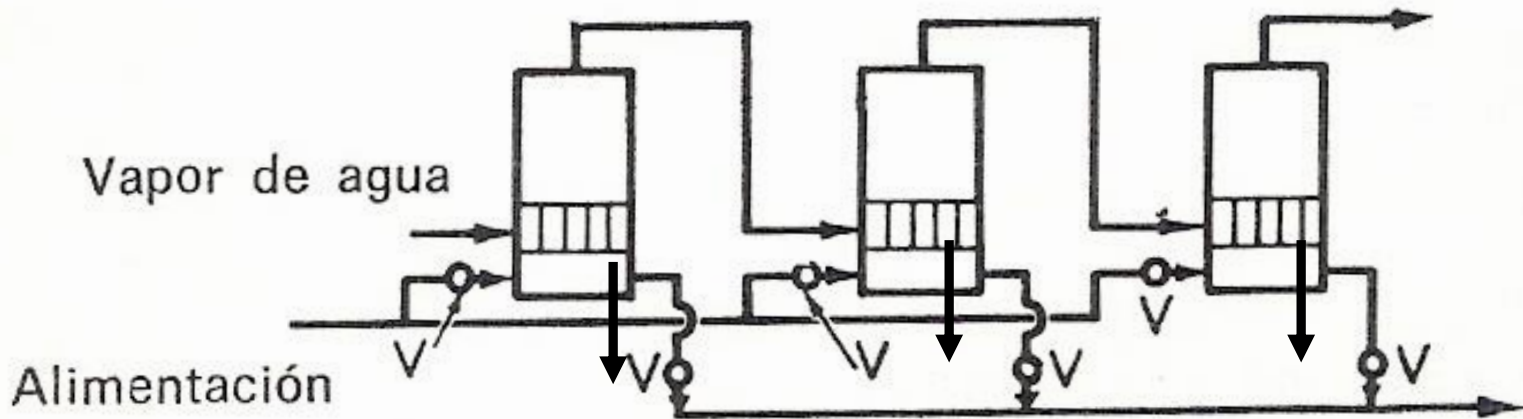


(b) Alimentación hacia atrás

# EVAPORACION

## ALIMENTACION EN PARALELO

- SE UTILIZA EN EVAPORADORES DE CRISTALIZACION.
- CONDUCE A UN MEJOR CONTROL DE LA CRISTALIZACION.
- EVITA BOMBLEAR ALIMENTACIONES DENSAS ENTRE EFECTOS.

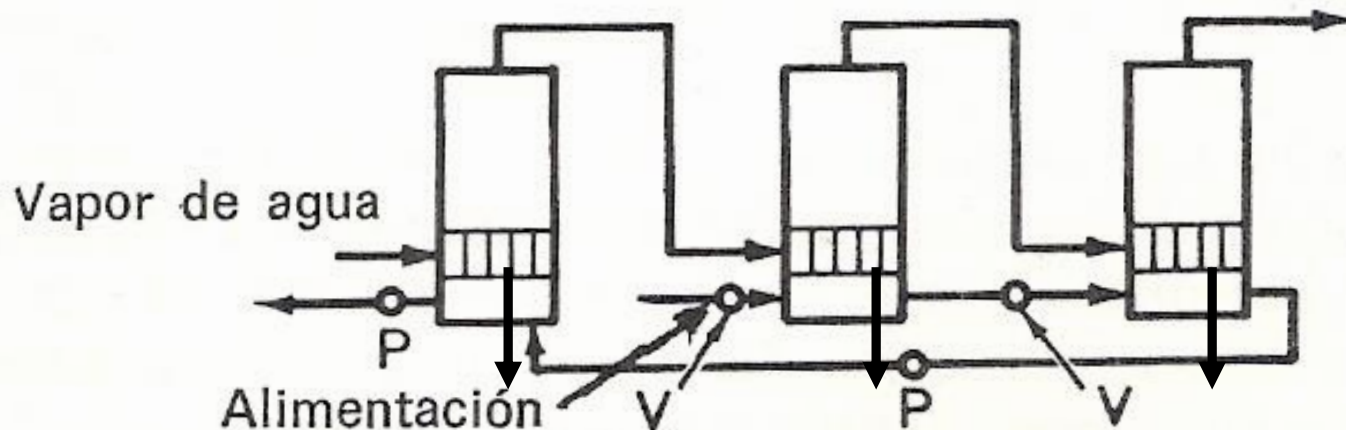


(c) Alimentación en paralelo

# EVAPORACION

## ALIMENTACION MIXTA

- SE UTILIZA CON MUCHOS EFECTOS
- APROVECHA SENCILLEZ DEL PARALELO CON LA MEJOR ECONOMIA DEL CONTRACORRIENTE.
- UTIL PARA LIQUIDOS MUY VISCOSOS.
- RECOMENDABLE CUANDO HAY GRANDES INCREMENTOS DE VISCOSIDAD AL AUMENTAR LA CONCENTRACION.



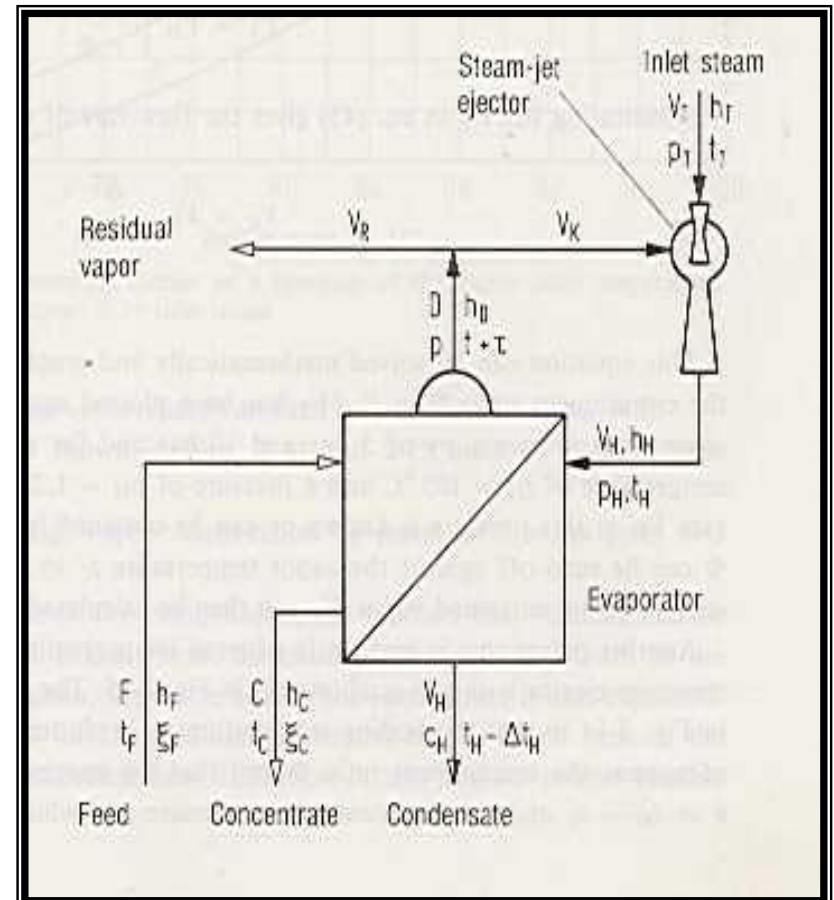
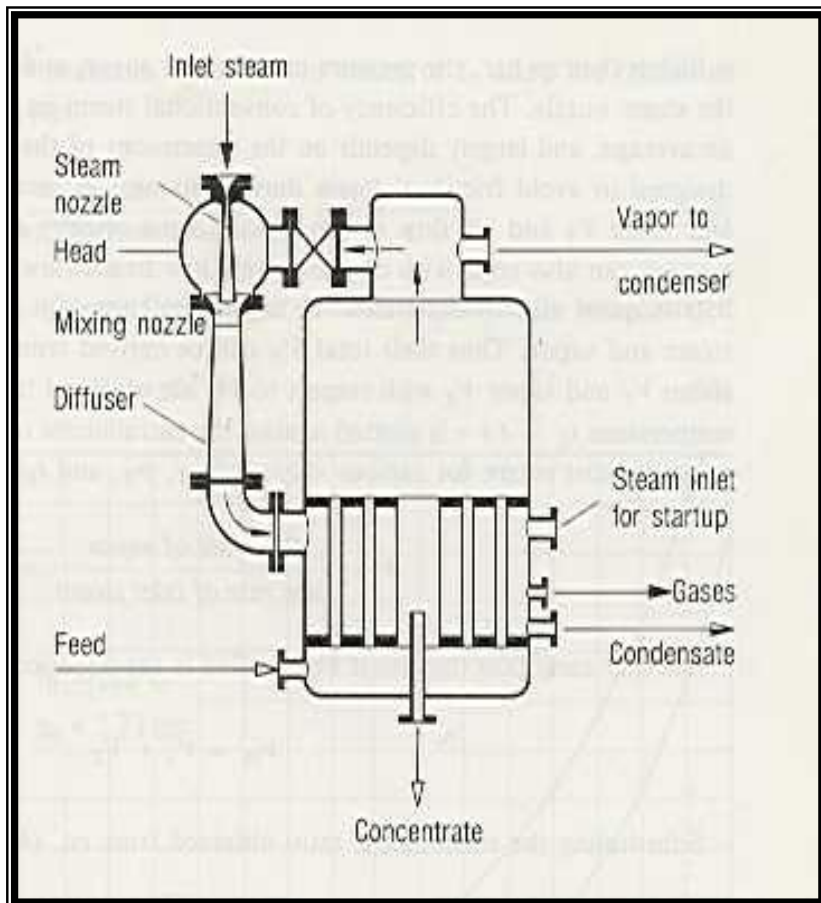
(d) Alimentación mezclada



# EVAPORACION

## TERMOCOMPRESIÓN

Es la práctica de recomprimir un vapor para aumentar su temperatura y permitir nuevamente su uso.



# ***EVAPORACION***

---

## **OPERACIÓN DE UN PROCESO AL VACÍO**

***COMPRESOR MECÁNICO***

***EYECTOR SIMPLE***

***EYECTOR DE DOS PASOS***

***CONDENSADOR DE SUPERFICIE***

# EVAPORACION

## CONDENSADOR BAROMETRICO

- EL VAPOR SE MEZCLA CON UNA LLUVIA DE AGUA DE REFRIGERACION.
- EL AGUA SE ELIMINA POR MEDIO DE BOMBAS DE CONDENSADO O POR UNA PIERNA BAROMETRICA.
- TUBO VERTICAL DE 10 m DE ALTURA.
- PARTE SUPERIOR CONECTADO CON EL VACIO, EXTREMO INFERIOR SELLADO CON AGUA DE UN POZO CALIENTE.

MANTIENE LA T° DE EBULLICION AL VALOR DESEADO.

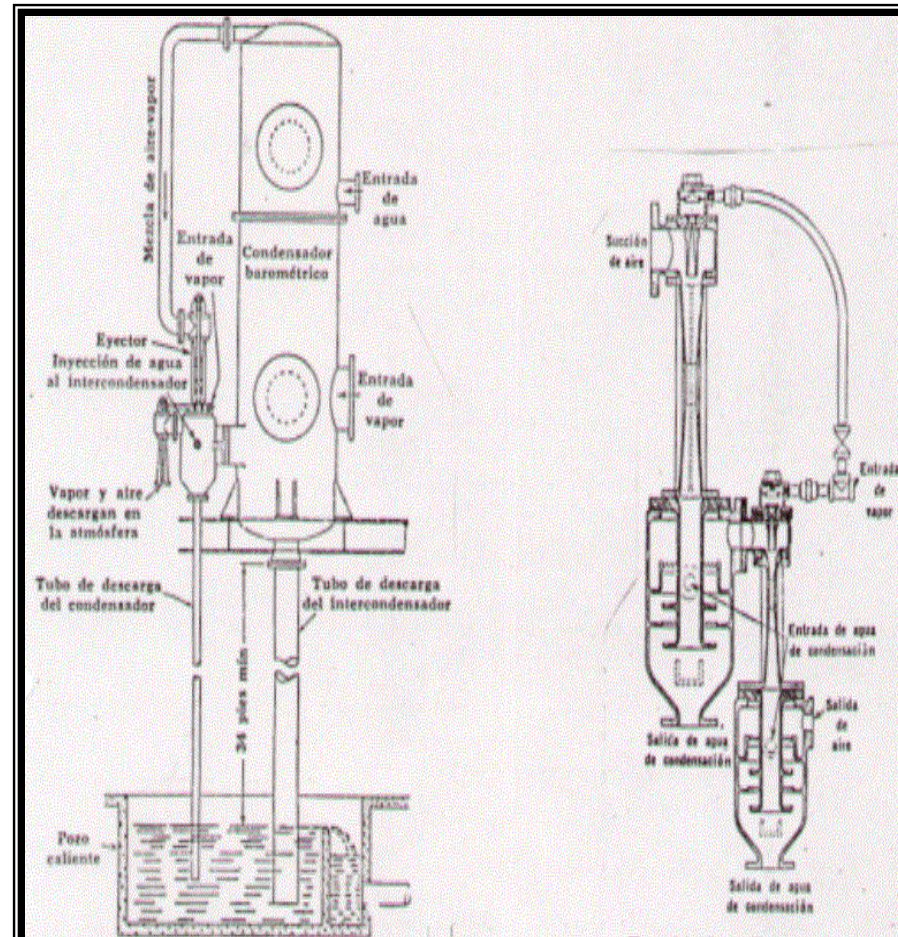


FIG. 14.17. Eyector de dos pasos con intercondensador que sirve como condensador barométrico. (Foster Wheeler Corporation)

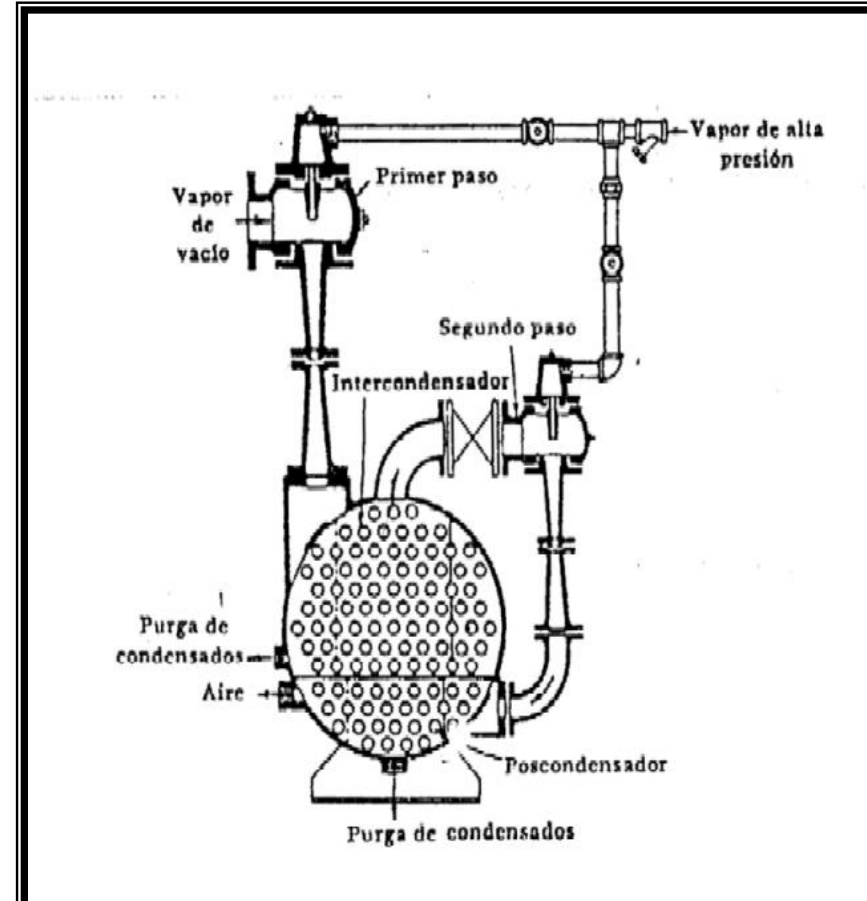
FIG. 14.18a. Eyector en dos pasos con inter y poscondensador de chorro. (Foster Wheeler Corporation)

# EVAPORACION

## CONDENSADOR DE SUPERFICIE

- EL VAPOR NO SE PUEDE MEZCLAR CON UNA LLUVIA DE AGUA DE REFRIGERACION.
- INTERCAMBIADOR DE TUBO Y CORAZA..

MANTIENE LA T° DE EBULLICION AL VALOR DESEADO.



# EVAPORACION

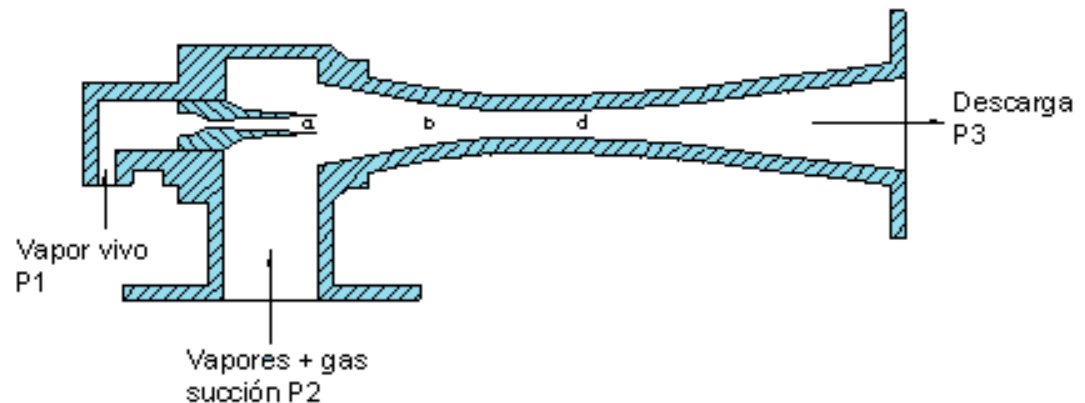
## EYECTOR

- EL VAPOR DE AGUA A PRESION SE INYECTA A TRAVES DE UNA BOQUILLA HASTA UNA CAMARA EN LA QUE SE COMBINA Y ARRASTRA LOS VAPORES Y GASES.
- LA MEZCLA PASAN A GRAN VELOCIDAD POR UNA BOQUILLA CONVERGENTE-DIVERGENTE, LA ENERGIA DE VELOCIDAD SE CONVIERTE EN ENERGIA DE PRESION.

### VACIO PRODUCIDO

- 1 PASO = 60 cm DE Hg
- 2 PASO = 74 cm DE Hg
- 3 PASO = 76 cm DE Hg

### EXTRAE LOS GASES INCONDENSABLES



# EVAPORACION

## COCIENTE DE ARRASTRE

Se obtiene igualando el trabajo neto disponible obtenido del chorro al trabajo real para la compresión de la mezcla en el difusor.

$$\frac{M_2}{M_1} = \left[ \frac{(H_1 - H_2)}{(H_4 - H_3)} E_1 E_2 E_3 - 1 \right]$$

$E_1$  = eficiencia de la boquilla

$E_2$  = eficiencia de compresión en el difusor

$E_3$  = eficiencia de la transferencia de momentum

$H_1$  = entalpía del vapor vivo a  $P_1$

$H_2$  = entalpía del vapor vivo después de su expansión y su entrópica a la  $P_2$

$H_3$  = entalpía de la mezcla al principio de la compresión en la sección del difusor a  $P_2$

$H_4$  = entalpía de la mezcla después de la compresión isoentrópica de  $P_2$  a la presión de la descarga  $P_3$

$M_1$  = vapor vivo a alta presión  $P_1$

$M_2$  = vapores arrastrados a presión  $P_2$

# ***EVAPORACION***

---

## **EJEMPLOS PRACTICOS**

# EVAPORACION

## METODO DE CALCULO

Balance de materia global:

$$W_0^L = W_1^L + W_1^V \quad [5.1]$$

Balance de materia del componente volátil:

$$W_0^L \cdot c_0^L = W_1^L \cdot c_1^L + W_1^V \quad [5.2]$$

Balance de entalpía:

$$\begin{aligned} W_0^S \cdot H_0^S + W_0^L \cdot h_0^L &= W_1^C \cdot h_1^C + W_1^V \cdot H_1^V + W_1^L \cdot h_1^L \quad \therefore \\ \therefore W_0^S (H_0^S - h_1^C) + W_0^L \cdot h_0^L &= W_1^V \cdot H_1^V + W_1^L \cdot h_1^L \end{aligned} \quad [5.3]$$

Transmisión de calor:

$$Q = W_0^S (H_0^S - h_1^C) = -W_0^L \cdot h_0^L + W_1^V \cdot H_1^V + W_1^L \cdot h_1^L = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [5.5]$$

En un problema normal de diseño habrá que determinar el área para la transmisión de calor, utilizando la Ecuación [5.5] por lo que teniendo en cuenta las Ecuaciones [5.1] a [5.5] se habrá logrado la determinación de  $W_0^S$ , caudal de vapor de calefacción, y  $W_1^V$ , caudal de vapor generado y con  $W_0^S$ ,  $Q$ , caudal de calor transmitido.

El problema inverso, en el que ya se disponga del evaporador y por consiguiente de su área  $A$ , nos permitirá calcular el coeficiente global de transmisión de calor  $U$ , para el sistema en experimentación.



# EVAPORACION

## EJEMPLO 1 DE CALCULO

Un evaporador de simple efecto, se emplea para concentrar 3 kg/seg de una disolución de NaOH desde el 50% al 75% en peso de NaOH. Para la calefacción se emplea vapor a  $4,8 \cdot 10^5$  Nw/m<sup>2</sup> absolutos (150,3 °C), y la presión de la zona de evaporación es de 100 mm Hg (51,6 °C). Experimentos de laboratorio indican que el coeficiente global de transmisión de calor aparente, será de 1,74 Kw/(m<sup>2</sup>°C). Calcular:

- 1) Caudal de vapor de calefacción en kg/seg.
- 2) Superficie de calefacción requerida.

*Datos:*

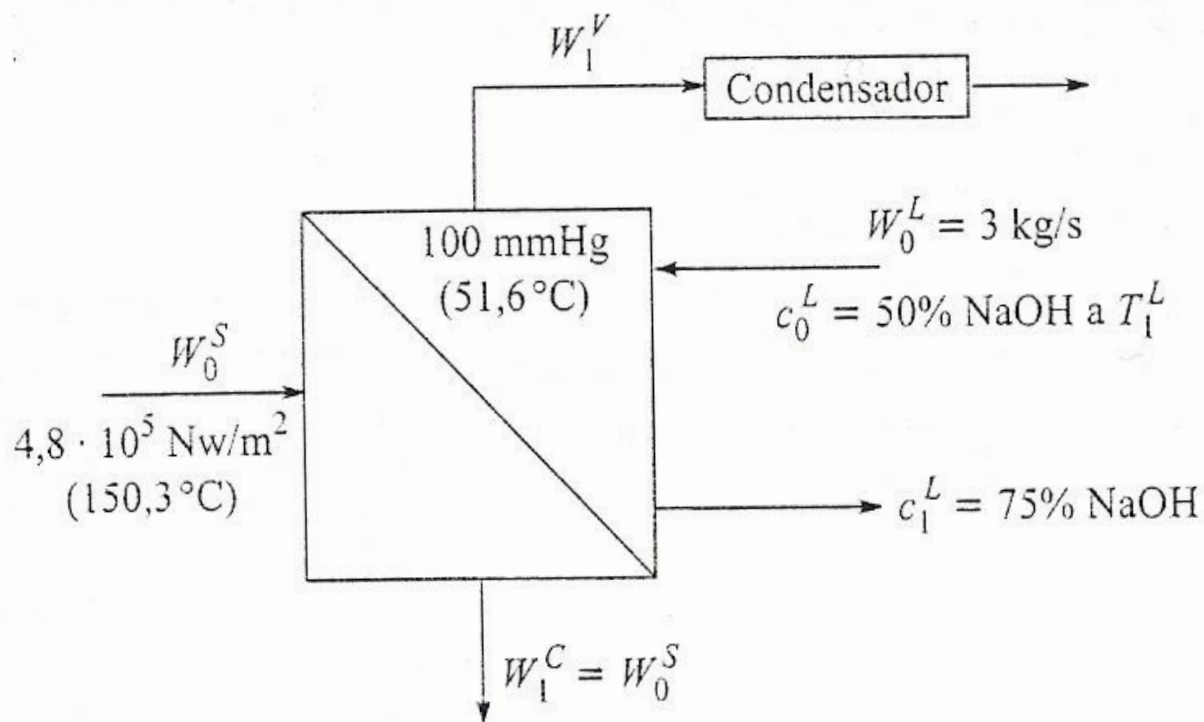
Utilizar tablas de presión de vapor de agua.

Supóngase que la disolución diluida, entra en el evaporador a la temperatura de ebullición en la zona de evaporación, y que el condensado abandona el evaporador a su temperatura de condensación.

$$\text{Ecuación de Regnault: } r \text{ (Kcal/kg)} = 606,5 - 0,695 \cdot T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

# EVAPORACION

Solución:



Balace de materia:

	Sólido	Líquido	Total
Disolución entrante	1,5	1,5	3
Disolución saliente	1,5	0,5	2
Líquido evaporado		1	1

# EVAPORACION

## EJEMPLO DE CALCULO

$$W_1^V = 1 \text{ kg/s}$$

$$W_0^S \cdot r_{T_0^S} = W_1^V \cdot r_{10}$$

Tablas de presión de vapor:  $4,8 \cdot 10^5 \frac{\text{Nw}}{\text{m}^2} \rightarrow T_0^S = 150,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$$100 \text{ mmHg} \rightarrow T_1^V = 51,6 \text{ }^\circ\text{C} = T_1^L$$

Ecuación de Regnault:  $r \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \right) = 606,5 - 0,695 \cdot t(^\circ\text{C})$

$$r_{4,9} = 606,5 - 0,695(150,3) = 503,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \therefore \quad 503,5 \cdot 4,18 \cdot 10^3 = 2104 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$r_{100} = 606,5 - 0,695(51,6) = 571,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \therefore \quad 571,2 \cdot 4,18 \cdot 10^3 = 2387 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$W_0^S \cdot 2104 \cdot 10^3 = (1)(2387 \cdot 10^3) \quad \therefore \quad W_0^S = 1,134 \frac{\text{kgH}_2\text{O}(v)}{\text{s}}$$

$$Q = U_{ap} \cdot A \cdot \Delta T_{ap} \quad ; \quad \Delta T_{ap} = T_0^S - T_1^L = 150,3 - 51,6 = 98,7 \text{ }^\circ\text{C}$$
$$Q = W_0^S r_{4,8} = (1,134)(2104 \cdot 10^3) = 2386 \cdot 10^3 \text{ wat.} \quad \therefore \quad 2386 \text{ Kw}$$

$$2386 = (1,74) \cdot A \cdot (98,7) \quad \therefore \quad A = 14 \text{ m}^2$$

# EVAPORACION

## EJEMPLO 2 DE CALCULO

Un evaporador de simple efecto, se emplea para concentrar 4 kg/seg de una disolución de BrNa desde 10% a 50% en peso. La presión en la zona de evaporación se mantiene, mediante un sistema condensador-bomba de vacío, a 150 mmHg.

Experimentos sobre la variación del coeficiente global de transmisión de calor con la temperatura dan los siguientes resultados:

$\Delta t (^{\circ}\text{C})$	6	14	28	42	45	50	56	61	70
$U \left( \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \right)$	0,726	1,393	2,090	2,264	2,322	2,264	1,161	0,290	0,041

- Determinar el área mínima requerida.
- Para el caso a) ¿qué presión deberá tener el vapor de calefacción?
- Caudal de vapor en kg/seg.

*Datos:*

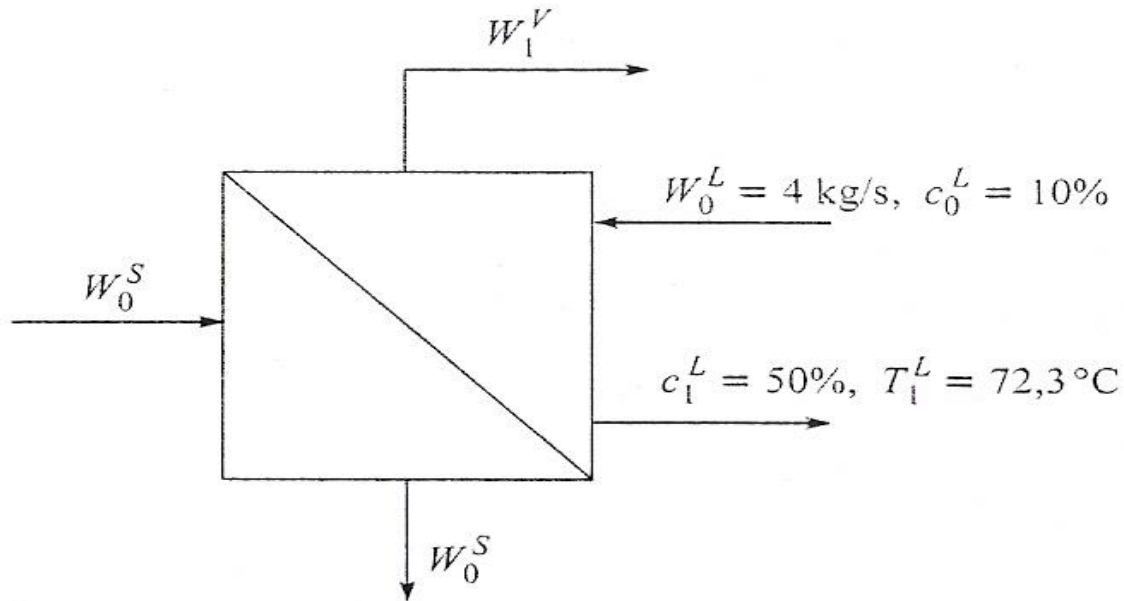
Temperatura de ebullición de la disolución de BrNa, a la presión de 150 mmHg, igual a 72,3 °C.

Supóngase que el condensado abandona el evaporador a su temperatura de ebullición y que la disolución diluida entra a la temperatura de ebullición de la cámara de evaporación.

# EVAPORACION

## EJEMPLO 2 DE CALCULO

Solución:



Balance de materia:

	Sólido	Líquido	Total
Disolución entrante	0,4	3,6	4,0
Disolución saliente	0,4	0,4	0,8
Líquido evaporado		3,2	3,2

$$W_1^V = 3,2$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \therefore \quad A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} \rightarrow A_{\min} = \frac{Q}{(U \cdot \Delta T)_{\max}}$$

# EVAPORACION

## EJEMPLO 2 DE CALCULO

Construimos la siguiente tabla:

$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	6	14	28	42	45	50	56	61	70
$U \left( \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$	0,726	1,393	2,090	2,264	2,322	2,264	1,161	0,290	0,041
$U\Delta T \text{ (Kw/m}^2\text{)}$	4,35	19,50	58,52	...	...	113,20	...	17,69	2,87

$$Q = W_0^S \cdot r_{P_0^S} = W_1^V r_{150}$$

Tablas de vapor:  $P_1^V = 150 \text{ mmHg} \rightarrow T_1^V = 60,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$r_{150} = 606,5 - 0,695(60,1) = 565,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \therefore 2365 \cdot 10^3 \frac{\text{Jul}}{\text{kg}}$$

$$Q = (3,2)(2365 \cdot 10^3) = 7568 \cdot 10^3 \text{ wat} \quad \therefore 7568 \text{ Kw}$$

$$A_{\text{mín}} = \frac{Q}{(U\Delta T)_{\text{máx}}} = \frac{7568}{113,20} = 66,8 \text{ m}^2$$

$\Delta T = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ←

# EVAPORACION

## EJEMPLO 2 DE CALCULO

$$\Delta T = T_0^S - T_1^L = T_0^S - 72,3 = 50 \quad \therefore \quad T_0^S = 122,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De las tablas de vapor:  $P_0^S = 2,17 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \therefore \quad 21,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Nw}}{\text{m}^2}$

Balance de energía:

Temperatura de referencia:  $T_1^L = 72,3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$W_0^S r_{P_0^S} = W_1^V r_{150} = 7568 \text{ Kw}$$

$$r_{P_0^S} = 606,5 - 0,695(122,3) = 526,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \quad \therefore \quad 2199 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \left. \vphantom{r_{P_0^S}} \right\}$$

$$W_0^S \cdot 2199 \cdot 10^3 = 7568 \cdot 10^3 \quad \therefore \quad W_0^S = 3,44 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



**Muchas gracias por su atención**