

EVAPORATORI – CONCENTRATORI

Si definiscono: “operazioni unitarie” un insieme di azioni di natura fisica, mentre “processi unitari” quando negli stadi vengono realizzati processi chimici (processi di sintesi ecc.).

L’evaporazione è una operazione unitaria utilizzata per separare ed eventualmente recuperare il solvente contenuto in una soluzione.

La **concentrazione** è una operazione unitaria la cui finalità è la concentrazione di una soluzione tramite evaporazione del solvente (di solito acqua).

In questo sistema si è in presenza di due tipi di vapore, quello di rete (utilizzato per riscaldare) che cede il calore di condensazione e il vapore che si sviluppa dalla ebollizione della soluzione.

I problemi relativi alla concentrazione sono tre:

- 1) la trasmissione del calore;
- 2) la separazione del vapore prodotto;
- 3) la determinazione della portata del vapore di alimentazione (di rete).

Si sceglieranno quindi le condizioni operative e le apparecchiature in modo di avere il massimo scambio .

La **concentrazione** è utilizzata per concentrare: soluzioni inorganiche, tipo : NaOH e vari Sali, oppure per soluzioni alimentari tipo il saccarosio.

Il vapore prodotto dall’evaporazione del solvente della soluzione deve necessariamente essere “abbattuto”.

Quest’ultima operazione viene effettuata in una apparecchiatura ausiliaria chiamata condensatore. Esso può essere a miscela, nel caso in cui si deve condensare vapore d’acqua, oppure a serpentina se si tratta di solvente che deve essere recuperato (quindi non deve miscelarsi con l’acqua).

Il concentratore

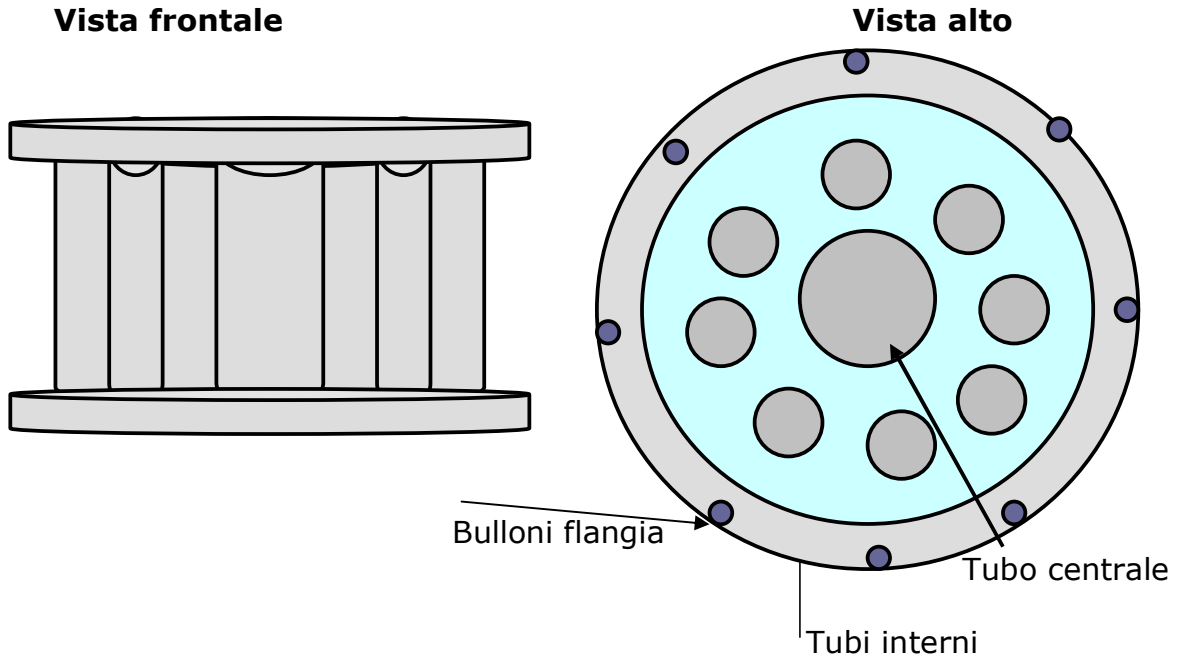
I concentratori possono essere a circolazione naturale o forzata (utilizzando pompe, per liquidi viscosi) e del tipo:

1. a fascio tubiero orizzontale. Il vapore di rete passa all’interno dei tubi, dove cede il proprio calore latente di condensazione, mentre la soluzione è all’esterno dei tubi. I tubi disposti orizzontalmente rappresentano un ostacolo ai moti convettivi e il coefficiente di trasferimento globale è basso.
2. a fascio tubiero verticale (tubi corti). A seguito dei moti convettivi la soluzione sale all’interno dei tubi e scende dal condotto centrale.

Il vapore di rete non circola all’interno di tubi ma li riscalda esternamente. I tubi hanno lunghezza di circa 1.20 m.

Il concentratore a tubi verticali si può considerare l’insieme di tre pezzi, flangiati tra loro:

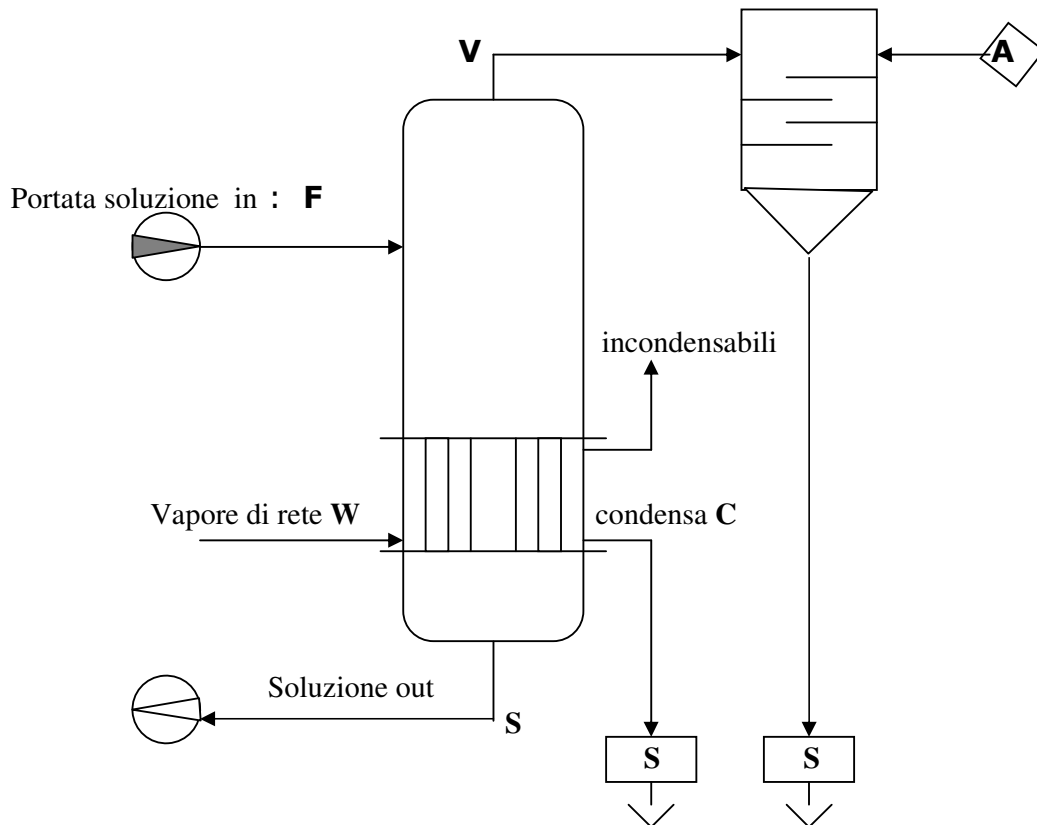
- a) il pezzo superiore, del tutto simile a quello inferiore, dove avvengono i moti convettivi che movimentano la massa della soluzione;
- b) il pezzo centrale costituito da un monoblocco cilindrico avente al centro un tubo di maggiore diametro in cui scende la soluzione per azione dei moti convettivi, e a giro altri tubi di minor diametro dentro cui sale la soluzione.



I vapore di rete W circola all'interno del monoblocco riscaldando i tubi dentro cui si muove la soluzione.

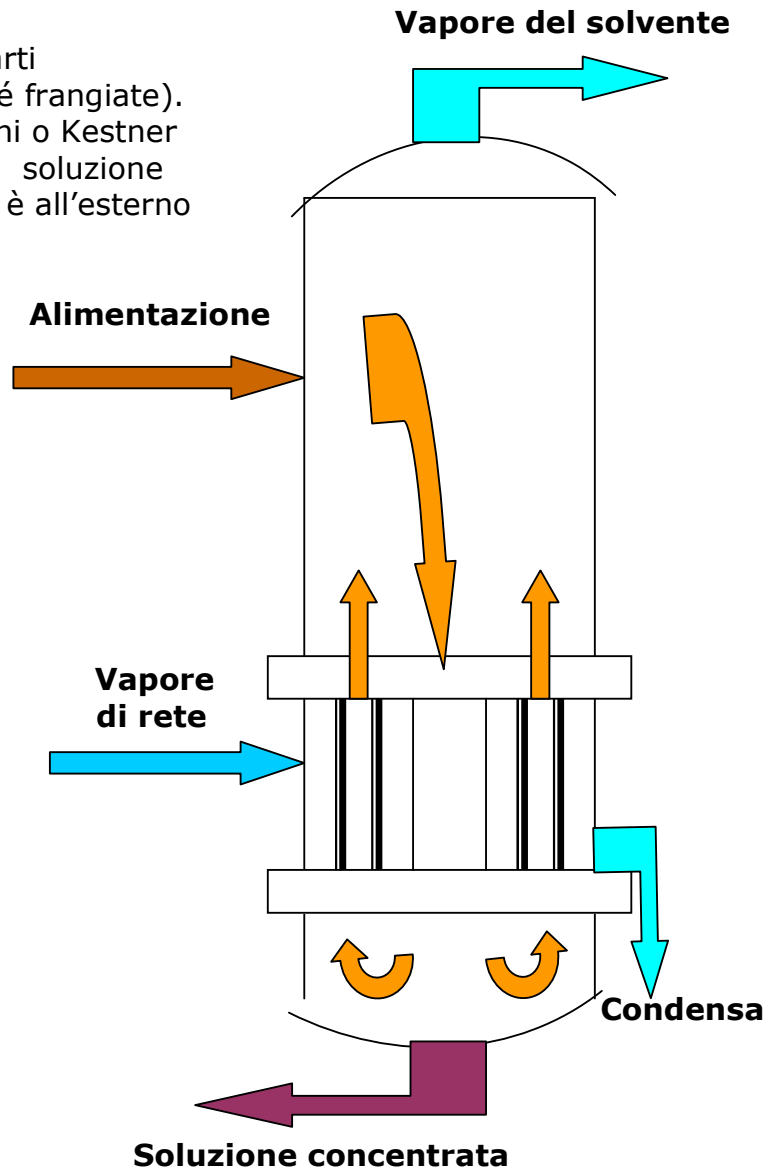
Il vapore di rete, in genere "surriscaldato" a 150°C, cioè ottenuto a pressioni di circa 5 ata, condensa e cede il calore latente di condensazione.

Concentratore a singolo effetto con condensatore a miscela barometrico



Le caratteristiche del concentratore a tubi verticali sono:

1. Elevato coefficiente di trasferimento globale U;
2. facile pulizia delle varie parti dell'apparecchiatura (perché frangiate).
Negli evaporatori a tubi lunghi o Kestner (i cui tubi arrivano a 7 m.) la soluzione passa dentro tubi e il vapore è all'esterno di essi.



Dimensionamento degli evaporatori.

I concentratori possono essere a singolo effetto o a multiplo effetto (due o anche tre). Il dimensionamento consiste nella determinazione della portata del vapore di rete, della superficie di scambio del concentratore e la portata di acqua del condensatore.

La la pressione e quindi la temperatura di esercizio, il coefficiente U e le entalpie e calori latenti sono dati del problema. Il problema si risolve con bilanci di materia e di energia nonché con l'impiego delle equazioni di trasferimento del calore.

Legenda:

- F** portata della soluzione in Kg/h;
- Co** concentrazione della soluzione in ingresso (in %);
- W** portata del vapore di rete in Kg/h;
- λ_w** calore latente del vapore di rete, Kcal/Kg o Kcal/mol;
- V** portata del vapore uscente Kg/h
- S** portata della soluzione in uscita Kg/h
- C** portata della condensa del vapore di rete Kg/h
- C_s** concentrazione (in %) della soluzione in uscita
- H_w** entalpia del vapore di rete

BILANCI:

Sono di tre tipi:

- 1) Bilancio totale di materia;
- 2) Bilancio al soluto;
- 3) Bilancio di energia.

1) Bilancio di materia:

In condizioni stazionarie la somma delle portate entranti è uguale alla somma di quelle uscenti:

$$F = S + V$$

2) Bilancio al soluto:

$$F * Co = S * Cs$$

La portata in peso del soluto in ingresso è uguale a quella in uscita.

3) Bilancio di energia

Si considera il contenuto entalpico delle unità in ingresso e in uscita dell'evaporatore:

La somma dell'energia entrante è uguale alla somma di quella uscente.

Considerando le quantità di calore associato a ciascuna portata, si può scrivere:

$$Q_F + Q_W = Q_V + Q_C + Q_S$$

Ciascuna quantità di calore associato ad una portata, cioè il suo contenuto termico, è uguale al prodotto dell'Entalpia, riferita all'unità di massa o mole, per la portata.

In prima approssimazione l'Entalpia dei liquidi si può considerare uguale, ma solo come valore numerico, alla temperatura del liquido stesso. Pertanto si ha:

$$F * h_F + W * H_W = V * H_V + S * h_S + C * h_C$$

Considerando che la differenza tra il contenuto termico del vapore di rete entrante e quello della condensa prodotta è uguale al calore ceduto dallo stesso vapore (calore latente del passaggio di stato) si ha:

$$W * H_W - C * h_C = W * \lambda_W$$

Pertanto il bilancio diventa: $F * h_F + W * \lambda_W = V * H_V + S * h_S$
 λ_W rappresenta il calore latente di condensazione.

Equazione di trasferimento

L'equazione è : $Q \text{ scambiato} = U * A * (t_w - t_s)$
dove Q è quello trasferito dal vapore di rete alla soluzione:

$$Q = W * \lambda_W$$

Da questa formula è possibile calcolare la superficie del concentratore.

Condensatori dei vapori

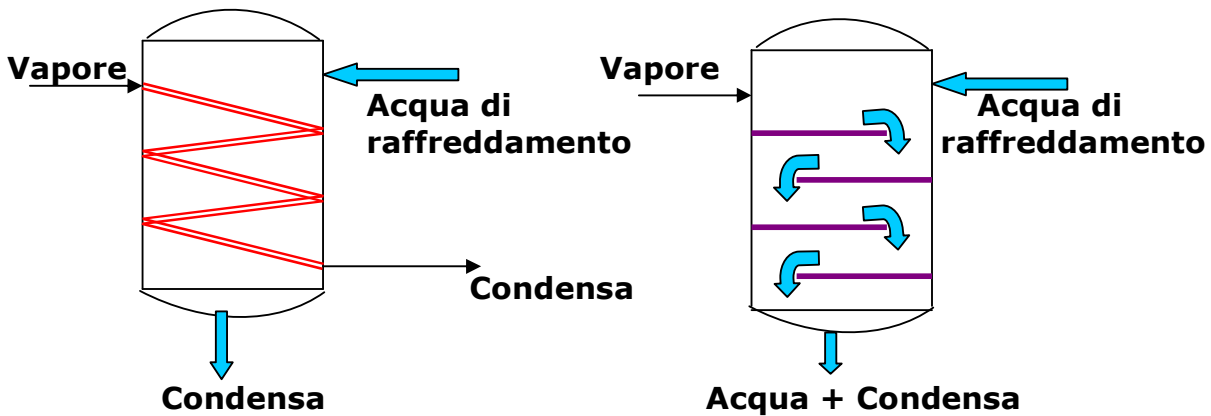
I Condensatori dei vapori sviluppati dalla soluzione in ebollizione possono essere:

a) a fascio tubero. Vengono utilizzati negli evaporatori quando la finalità è il recupero del solvente. Il vapore passa all'interno del fascio tubero mentre l'acqua di raffreddamento è fuori.

b) a miscela. Utilizzati nei concentratori dove il vapore è vapor d'acqua. Si ha intimo miscelamento del vapore con l'acqua di raffreddamento. L'acqua entra in testa al condensatore e cadendo all'interno passa su gradini e ciò favorisce il contatto vapore-acqua favorendo la condensazione del vapore. Se il concentratore lavora in depressione, cioè all'interno vi è una pressione inferiore a quella atmosferica, si usa il "miscelatore barometrico".

Esso ha nella parte inferiore una canna barometrica di lunghezza di circa 8 m che serve a compensare la depressione presente all'interno del concentratore e quindi del condensatore a miscela. Il bilancio del condensatore, che permette di determinare la portata di acqua necessaria ad abbattere il vapore, è nei due casi diverso.

A quota zero, alla base del condensatore, prima dello scarico, è presente uno scaricatore di condensa (a campana galleggiante o a sospensione a molla) che permette l'uscita, man mano che si forma, della sola condensa.



Condensatore a fascio tubero

Condensatore a miscela

Bilanci di energia dei condensatori:

a) Condensatore a fascio tubero:

Il calore che entra in gioco, cioè quello scambiato Q_S , che è uguale a quello necessario alla condensazione del vapore Q_D ed anche a quello assorbito dall'acqua di raffreddamento Q_F .

Rispettivamente si ha:

$$Q_S = U * A * \Delta t_{ml};$$

$$Q_D = \lambda_v * V_{sol.};$$

$$Q_F = F_{acqua} * C_p * (t_{Fu} - t_{Fi})$$

e quindi: $Q_S = Q_D = Q_F$

Osservando Q_D è bene ricordare che la quantità di calore associato ad una grandezza è uguale all'entalpia (per unità di massa o di mole) moltiplicata per la portata della grandezza stessa.

Legenda:

U rappresenta il coefficiente globale di scambio;

A la superficie del fascio tubero;

t_v la temperatura del vapore sviluppato dalla soluzione in ebollizione proveniente dal concentratore;

t_{Fi} la temperatura dell'acqua fredda in ingresso;

$$\Delta t_{ml} = \frac{(t_v - t_{Fi}) - (t_v - t_{Fu})}{\ln \frac{(t_v - t_{Fi})}{(t_v - t_{Fu})}}$$

t_{Fu} la temperatura dell'acqua fredda in uscita;

λ_v il calore latente di condensazione del vapore della soluzione (Kcal/Kg o Kcal/Kmol);

V_{sol.} la portata in Kg/h del vapore uscente dal concentratore (calcolato dal bilancio di quest'ultimo);

F portata di acqua di raffreddamento necessaria a condensare il vapore;

C_p calore specifico dell'acqua (valore = 1);

L'applicazione delle tre formule sopra riportate permette la determinazione della portata **F** di acqua di raffreddamento necessaria a condensare il vapore e di calcolare inoltre la superficie **A** del fascio tubero del condensatore.

b) **Condensatore a miscela:**

In questo caso il problema si affronta considerando il bilancio energetico globale.

Q_v quantità calore che entra con il vapore + **Q_f** calore associato all'acqua di raffreddamento = **Q_{v+f}** quantità di calore uscente (condensa + acqua).

Pertanto: **Q_v + Q_f = Q_{v+f}** ; cioè **H_v * V_{sol.} + F * h_f = (V_{sol.} + F) * h_c**

H_v rappresenta l'entalpia del vapore in Kcal/kg;

h_f e **h_c** rappresentano le entalpie dei due liquidi, in ingresso e in uscita (in Kcal/kg).

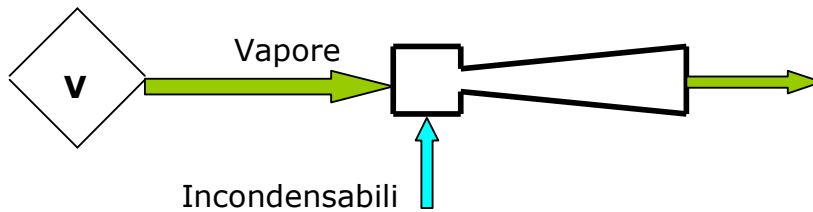
Si ha:
$$F = V * \frac{(H_v - h_c)}{(h_c - h_f)}$$

La formula permette di calcolare la portata **F** in Kg/h, che rappresenta la quantità minima di acqua necessaria alla condensazione dei vapori.

Il più delle volte l'operazione della concentrazione viene effettuata a pressione minore di una atmosfera, perché in questo modo l'ebollizione della soluzione avviene a temperatura minore. Per compensare la depressione esistente nell'impianto che ostacolerebbe l'uscita dei liquidi in genere vengono utilizzati **condensatori barometrici**. Così chiamati perché sono disposti ad una certa altezza da terra, in modo tale che l'altezza del tubo di scarico permette di compensare la eventuale minore pressione di operazione che vi è nel concentratore e di conseguenza nel condensatore.

L'altezza di 10,33 m. corrisponde ad una atmosfera. In genere, operando con frazioni di atmosfera, si utilizzano altezze, del tubo, di sette-otto metri.

Per la fuoruscita degli incondensabili, sempre presenti (2 %) , si utilizzano gli **eiettori**, i quali funzionano in modo analogo alla pompa ad acqua usata per provocare depressione nelle filtrazioni sotto vuoto. Nell'eiettore viene inviato un pennello di vapore di rete, il quale passando da una sezione più piccola ad una più grande nel corpo dell'eiettore, provoca un risucchio e permette l'eliminazione degli in condensabili.

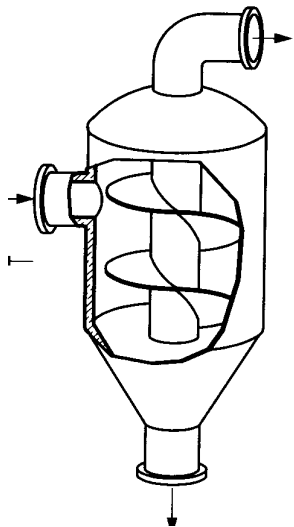


Si può utilizzare allo scopo anche una pompa ad anello liquido.

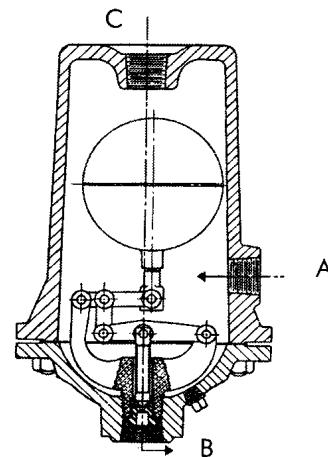
Altre apparecchiature ausiliarie sono:

a) **scaricatori di condensa** del vapore di rete. Possono essere a secchiello rovesciato o a galleggiante (funzionano come quelli del water), essi permettono lo scarico della condensa in modo discontinuo, altrimenti si avrebbe scarico continuo di vapore nell'atmosfera (quando si è formata una certa quantità di condensa scatta un meccanismo che ne permette lo scarico, alla fine, in modo automatico, lo scarico si chiude).

b) **separatori di trascimento a ciclone**. Permettono di recuperare gocce di soluzione trascinate dal vapore che si sviluppa dal concentratore. Il vapore circola lungo l'elica del ciclone abbandonando le gocce che ritornano all'interno del concentratore.



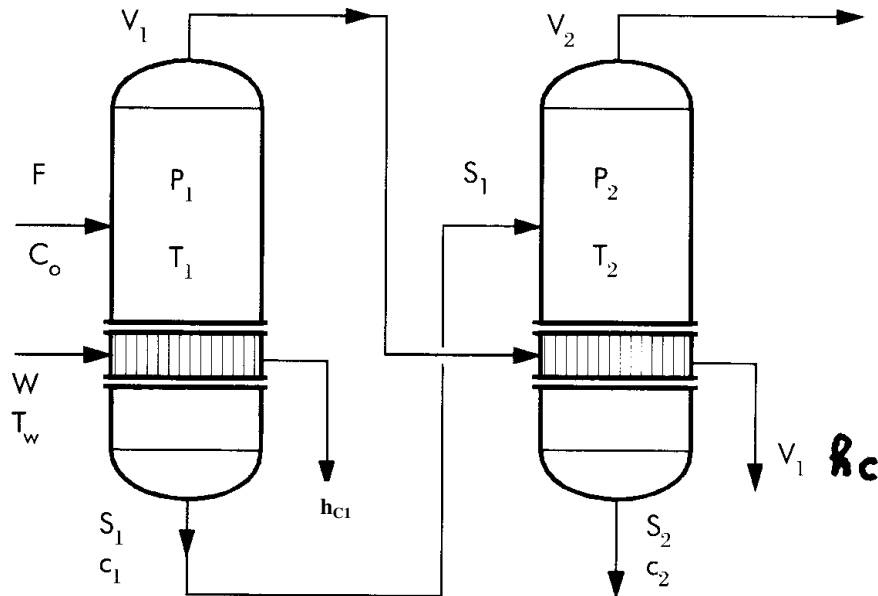
Separatore di gocce



Scaricatore di condensa a "galleggiante"

Duplice effetto in equicorrente

Per migliorare l'efficienza si usano multipli effetti.



Il vapore di rete entra nel primo evaporatore, il vapore che fa bollire la soluzione nel secondo evaporatore (che ha $T_2 > T_1$), è V_1 che ha temperatura T_1 uguale a quella di ebollizione della soluzione in E_1 , pertanto l'evaporatore E_2 deve operare necessariamente in depressione.

Le differenze tra il duplice effetto in equicorrente dal controcorrente sono:

- 1) in equicorrente la soluzione concentrata passa nel secondo evaporatore dove la t° è inferiore, con aumento della viscosità e diminuzione di U (Coeff. Globale di scambio).
Nel controcorrente U resta pressoché costante.
- 2) in equicorrente lo spostamento della soluzione dal primo al secondo evaporatore è spontaneo, mentre per passare dal secondo al primo nel controcorrente necessita di una pompa;
- 3) L'equicorrente si preferisce nella concentrazione di prodotti organici (non si ha l'impatto (nel secondo evaporatore) tra la soluzione concentrata e il vapore di rete).
- 4) Operando in depressione, in entrambi i casi, le condense devono essere estratte con pompe.

Il numero ottimale di effetti varia tra 3 e 5.

Bilanci e dimensionamento di un duplice effetto in equicorrente

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bilanci di materia al 1° effetto:} \quad \mathbf{F = V_1 + S_1} \quad \mathbf{F * C_o = S_1 * C_1} \\ \text{Bilancio di energia al 1° effetto:} \quad \mathbf{F * h_F + W * \lambda_W = V_1 * H_{V1} + S_1 * h_{S1}} \\ \text{Equazione di trasferimento al 1° effetto:} \quad \mathbf{Q_1 = U_1 * A_1 * (T_W - T_1)} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bilanci di materia al 2° effetto:} \quad \mathbf{S_1 = V_2 + S_2} \quad \mathbf{S_1 * C_1 = S_2 * C_2} \\ \text{Bilancio di energia al 2° effetto:} \quad \mathbf{V_1 * \lambda_{V1} + S_1 * h_{S1} = V_2 * H_{V2} + S_2 * h_{S2}} \\ \text{Equazione di trasferimento al 2° effetto:} \quad \mathbf{Q_2 = U_2 * A_2 * (T_1 - T_2)} \end{array} \right.$$

Bilancio di materia globale:

$$\mathbf{F = V_1 + V_2 + S_2;} \\ \mathbf{F * C_o = S_1 * C_1 = S_2 * C_2} \quad (\text{bilancio al soluto})$$

Bilancio di energia globale:

$$\mathbf{F * h_F + W * \lambda_W = V_2 * H_{V2} + S_2 * h_{S2} + V_1 * h_{c1}}$$

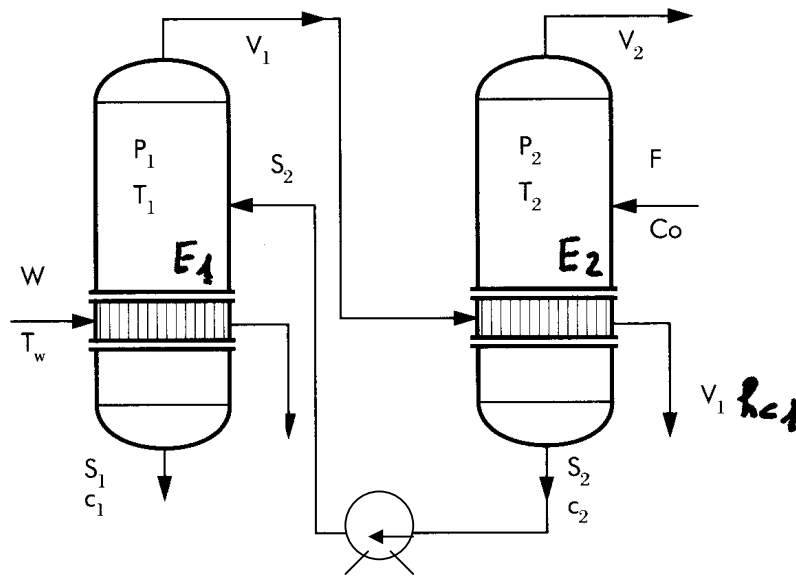
h_{c1} è l'entalpia della condensa, che ha valore numerico pari alla T_W .

Per la risoluzione dei problemi si utilizzano le formule dei bilanci. A volte è necessario ricorrere a sistemi di equazioni.

Nella risoluzione dei problemi si considera ininfluenza l'IPE, e il valore delle entalpie dei liquidi si assimila uguale alle t° degli stessi.

I valori delle entalpie vengono lette nelle apposite tabelle, conoscendo la pressione in ata o in bar del vapore di rete e la pressione di esercizio nei due effetti o attraverso le temperature.

Duplice effetto in controcorrente



$$\begin{cases}
 \text{Bilanci di materia al 1° effetto: } & \mathbf{S_2 = V_1 + S_1} & \mathbf{S_2 * C_2 = S_1 * C_1} \\
 \text{Bilancio di energia al 1° effetto: } & \mathbf{S_2 * h_{S2} + W * \lambda_W = V_1 * H_{V1} + S_1 * h_{S1}} \\
 \text{Equazione di trasferimento al 1° effetto: } & \mathbf{Q_1 = U_1 * A_1 * (T_W - T_1)}
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \text{Bilanci di materia al 2° effetto: } & \mathbf{F = V_2 + S_2} & \mathbf{F * Co = S_2 * C_2} \\
 \text{Bilancio di energia al 2° effetto: } & \mathbf{V_1 * \lambda_{V1} + F * h_F = S_2 * h_{S2} + V_2 * H_{V2}} \\
 \text{Equazione di trasferimento al 2° effetto: } & \mathbf{Q_2 = U_2 * A_2 * (T_1 - T_2)}
 \end{cases}$$

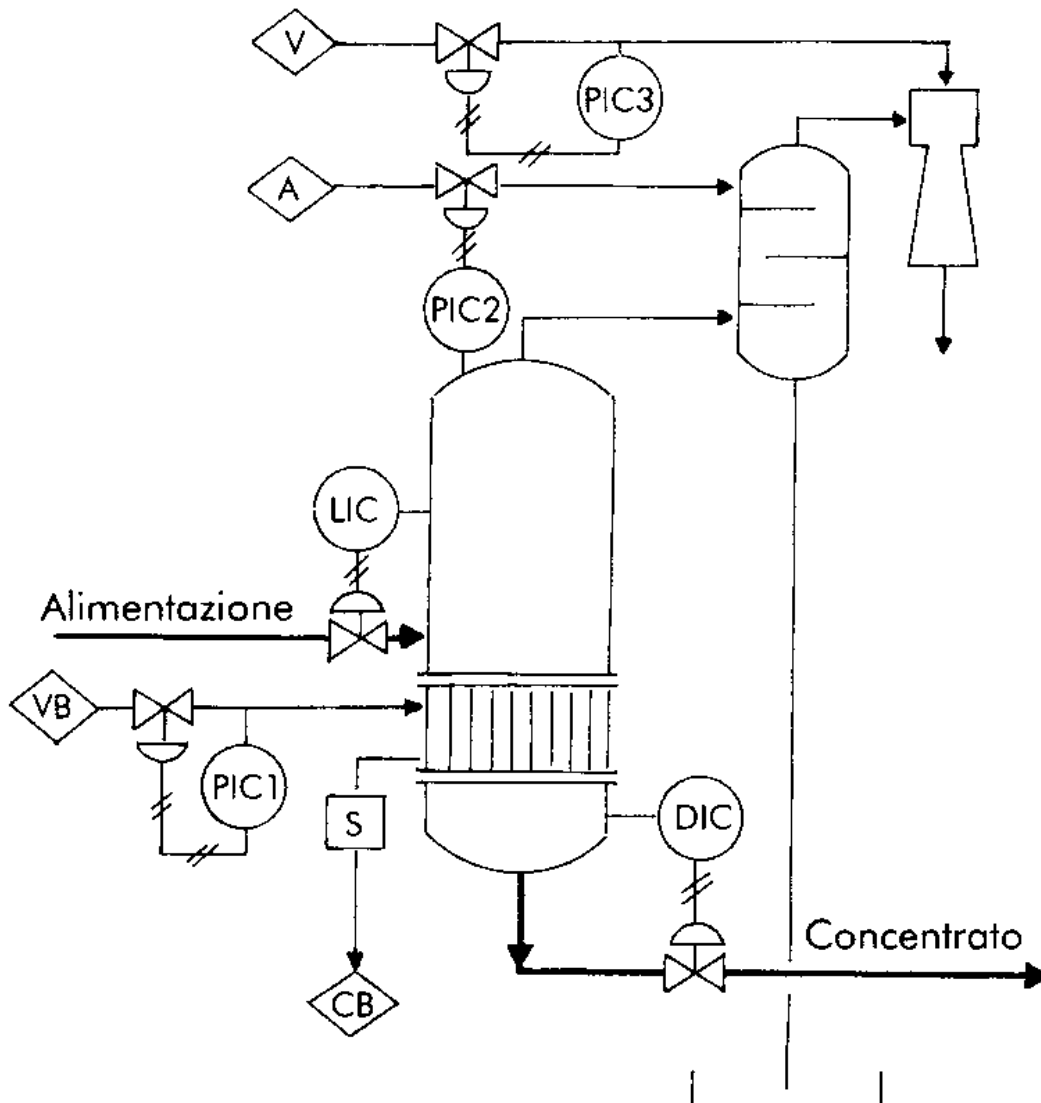
Bilancio di materia globale: $\mathbf{F = V_1 + V_2 + S_1}$

Bilancio al soluto $\mathbf{F * Co = S_1 * C_1 = S_2 * C_2}$

Bilancio di energia globale:

$\mathbf{F * h_F + W * \lambda_W = V_2 * H_{V2} + S_1 * h_{S1} + V_1 * hc_1}$

hc_1 è l'entalpia della condensa, che ha valore numerico pari alla T_w .



Concentratore a singolo effetto.

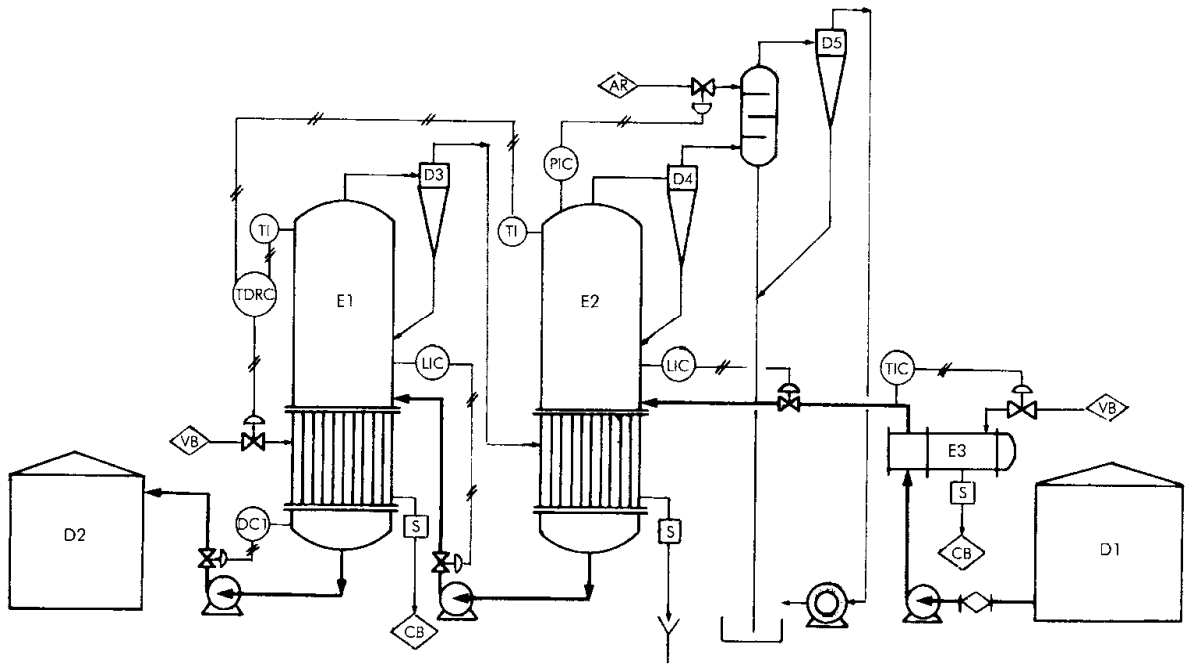
PIC1, PIC2, PIC3 sono indicatori controllori di pressione, cioè monitorizzano la pressione e agiscono sulla valvola servocomandata applicata al fluido.

LIC indicatore controller di livello (agisce sulla portata dell'alimentazione).

DIC indicatore controller della densità (agisce sulla uscita della soluzione)

V vapore

A acqua



- E1 e E2 evaporatori
- D1 e D2 serbatoi
- E3 scambiatore di calore (recuperatore di calore)
- S scaricatori di condensa
- D3,D4,D5 separatori di gocce
- AR acqua di raffreddamento
- VB vapore di rete
- TDRC registratore controller della temperatura (agisce sul vapore)
- DC1 controller della densità (agisce sull'uscita della soluzione)
- LIC indicatore controller del livello (agisce sulla portata)
- TIC indicatore controller della temperatura (agisce sul vapore di rete)