

tecnologia della CRISTALLIZZAZIONE

Appunti schemi esercizi versione#B1– Prof.A.Tonini – www.andytonini.com

INDICE: [TECNICHE](#) – [BILANCI](#) – [APPARECCHIATURE](#) – [APPENDICI](#) – [SCHEMI PROCESSO](#) – [ESERCIZI](#) -

GENERALITA'

E' una operazione unitaria di separazione solido-liquido il cui obiettivo è quello di ottenere un **solido** allo stato cristallino a partire da una **soluzione** concentrata. Il principio su cui si basa la cristallizzazione è quello di provocare la sovrassaturazione delle soluzioni e la conseguente precipitazione dei cristalli di soluto, successivamente inviati all'essiccamento.

La cristallizzazione (processo lento e selettivo), è un caso particolare di precipitazione, e si distingue da questa in quanto si ottiene per variazione delle condizioni di **solubilità** e non per reazione chimica o, quanto meno, non esclusivamente per reazione chimica.

DEFINIZIONI:

solubilità = la massima quantità di un soluto che a quella **temperatura** si scioglie in una data quantità di solvente.

soluzione satura = quando, in una data quantità di solvente a una certa temperatura, non è possibile sciogliere altro soluto (presenza di precipitato di fondo).

soluzione soprassatura = soluzione in cui il solvente contiene più soluto di quanto ne potrebbe contenere in condizioni normali di saturazione; sono condizioni di instabilità, sfruttate per la tendenza spontanea alla cristallizzazione.

cristallizzazione: formazione di cristalli solidi da soluzioni sature – soprassature;

SOLUBILITÀ E TEMPERATURA=

soluto: vari tipi – molto usati solidi ionici [cfr.solvatazione];

nelle reazioni di solubilizzazione risulta: $[SOLUTO] + n \cdot H_2O \rightarrow soluzione \pm calore$;

es: soluzione [ioni solvatati] $K^+aq Cl^-aq \rightarrow cristallizzaz. \rightarrow [K^+ Cl^-]_{sol}$; en. in gioco: Esolvatazione, Ereticolazione;

reazione **esotermica** ($\Delta H_{crist} < 0$, con Eret. > Esolv.); più comune **endotermica** ($\Delta H_{crist} > 0$, con Eret. < Esolv.);

la solubilità, quindi, dipende dalla temperatura: nella maggior parte dei casi la solubilità cresce al crescere della temperatura. (vedi curve di solubilità - [appendice](#)).

[\[INDICE\]](#)



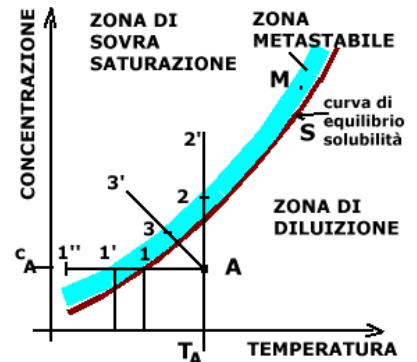
diagr.a blocchi

TECNICHE DI CRISTALLIZZAZIONE (vedi fig.a lato)

Considerando la curva di solubilità, [esempi in appendice], i punti a destra della curva [vedi p.to A] sono relativi a soluzione insature, in cui è possibile sciogliere ancora il soluto.

Partendo da una soluzione insatura (A), la cristallizzazione può essere ottenuta nei seguenti modi:

- **RAFFREDDAMENTO:** raggiungendo la saturazione per **raffreddamento a concentrazione costante:** in questo caso ci si sposta dal punto A, di temperatura T_a , al punto metastabile **1'**, **1''** e oltre, dove può iniziare a cristallizzare;
- **EVAPORAZIONE a T=cost.:** si può raggiungere la curva di saturazione per **evaporazione** del solvente a T costante (fornendo il calore di ebollizione a quella pressione, a T=cost.): così si provoca un aumento della concentrazione fino ad arrivare al punto **2**, **2'** e oltre;
- **EVAPORAZIONE ADIABATICA:** combinando le tecniche precedenti, **evaporazione + raffreddamento**, si raggiunge il punto **3'**: in questa maniera si evapora parte del solvente e si raffredda la soluzione concentrandola, abbreviando il tempo e migliorando la resa di cristallizzazione.



Alla fine del processo si passa alla separazione dei cristalli dalle acque madri, e al successivo essiccamento.

N.B.: definizioni: grado di supersaturazione: $\Delta c = c/c_s^T$; c=conc. a T; c_s = conc.saturaz. a T;

FATTORI di FORMAZIONE E CRESCITA DEI CRISTALLI --

il processo di cristallizzazione è il risultato di due fasi consecutive:

1- **nucleazione** = formazione dei germi [nuclei] cristallini, con velocità di

nucleazione V_{nucl} ;

2- **accrescimento** = aumento delle dimensioni dei cristalli, con velocità di

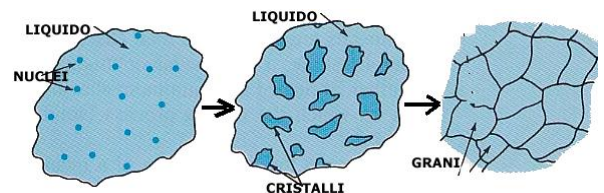
accrescimento V_{accr} ;

→se $V_{nucl} > V_{accr}$, allora avremo un elevato numero di cristalli, con dimensioni relativamente **piccole**;

→se $V_{nucl} < V_{accr}$, avremo relativamente pochi cristalli di **grandi** dimensioni.

La nucleazione è influenzata direttamente dalla **sovrassaturazione** della soluzione: tanto maggiore la sovrassaturazione della soluzione, tanto più facilmente si aggregano le molecole del soluto per formare centri di aggregazione.

Il **grado** di sovrassaturazione influenza anche le **dimensioni** dei cristalli: per elevato grado si formeranno molti centri [nuclei] di aggregazione, e di conseguenza i cristalli raggiungeranno dimensioni ridotte; invece se abbiamo una sovrassaturazione modesta si formeranno pochi centri di nucleazione che formeranno cristalli di elevate dimensioni.



Altri fattori per fare cristalli di **grandi** dimensioni possono essere i seguenti:

- Nella cristallizzazione del NaHCO_3 si lavora a **temperature** molte elevate in modo da favorire la formazione di pochi cristalli, quindi si diminuisce la temperatura, favorendo l'accrescimento, che, avvenendo su pochi cristalli, darà luogo a cristalli di grandi dimensioni.
- Introducendo nella soluzione sovrasatura **germi** di cristallizzazione: essi fungono da centri di accrescimento.
- L'**agitazione** può favorire l'aggregazione dei microcristalli.
- La presenza di **impurezze** può in certi casi modificare la forma dei cristalli ottenuti (modificazioni reticolari).

[INDICE]

BILANCI DI MATERIA DELLA CRISTALLIZZAZIONE:

► **CASO CRISTALLIZZAZ. PER RAFFREDDAMENTO** – fig.1:

posto F =alimentaz., conc.cf [in massa]; F_{CR} =cristalli solidi [sale cristallizzato];

F_S = portata soluz.saturo, conc. cs [o conc.uscita dal cristallizzatore c_{USC}];

cristallizzatore discontinuo a raffreddamento; sep.centrifugo;

■ cristalli **anidri**- bilancio globale: $F = F_{CR} + F_S$; bil.soluto: $F \cdot cf = F_S \cdot cs + F_{CR}$;

■ cristalli **idrati**- alcuni sali inglobano molecole di H_2O nelle molecole di cristallizzazione (**cristalli idrati**), quindi si ha una massa di cristallizzato maggiore di quella iniziale. → bilancio globale: $F = F_{CR}^i + F_S$;

con F_{CR}^i portata uscente crist.idrati; masse molari crist.anidro M_{an} , crist.idrato M_{id} ;

sarà: $F_{CR}^i/F_{CR} = M_{id}/M_{an} = K$; sostituendo nel bilancio globale: $F = F_S + F_{CR} \cdot K$;

N.B.:nota la solubilità $\gamma = g_{SOLUTO}/100g\text{H}_2\text{O}$ → conc. $cs = g_{SOL}/(g_{SOL}+100)$;

► **CASO CRISTALLIZZAZ. PER EVAPORAZIONE** – fig.2:

cristallizzatore discontinuo per evaporazione; sep.centrifugo;

bilancio globale: $F = F_{CR} + F_S + V$; e similmente: $F = F_{CR}^i + F_S + V$;

RESA DI CRISTALLIZZAZIONE –

Il rendimento dell'operazione di cristallizzazione si calcola sul bilancio di materia:

→ $\eta = [F_{CR}/ F \cdot cf] \times 100$

[INDICE]

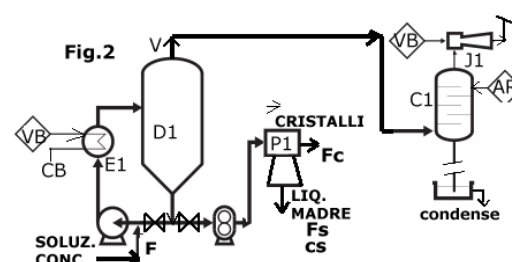
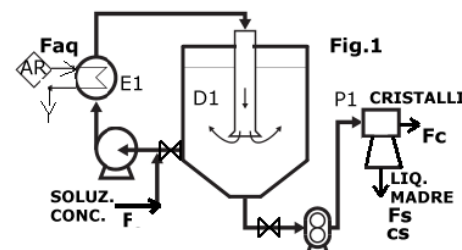
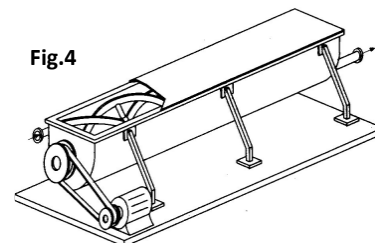


Fig.4



APPARECCHIATURE (vedi anche **Appendice**)-

Apparecchiature usate per la cristallizzazione: in antico p.es. le saline; attualmente quelle **industriali** possono essere classificate in base alle tecniche di cristallizzazione;



Fig.3

1) Cristallizzatori a RAFFREDDAMENTO:

■ **cristallizzatori a paniere**- fig.3, costituiti da un recipiente in cui la soluzione calda sovrasatura viene posta a raffreddare;

■ **cristallizzatore Swenson-Walker**- fig.4, continuo, munito di un sistema di agitazione a oscillamento, costituito da un serbatoio semicilindrico ad asse orizzontale in cui circola un fluido intermedio freddo; all'interno ruota una coclea cava, o un pacco di dischi cavi, immersi per metà; i cristalli si depositano sul fondo o aderiscono alla coclea; un raschiatore posto sopra il livello liquido stacca i cristalli aderenti che ricadono nel liquido.

■ **cristallizzatore a serbatoio a circolazione forzata**- fig.5:

nel raffreddatore esterno la soluzione raggiunge situazioni di sovraturazione,

l'inizio nucleazione e accrescimento avviene alla base del serbatoio; la soluzione viene ricircolata fluendo dalla zona di calma superiore. Si può lavorare anche sotto vuoto.

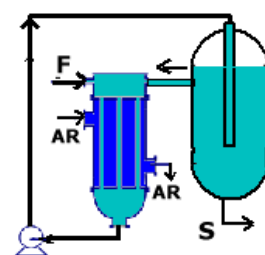


Fig.5

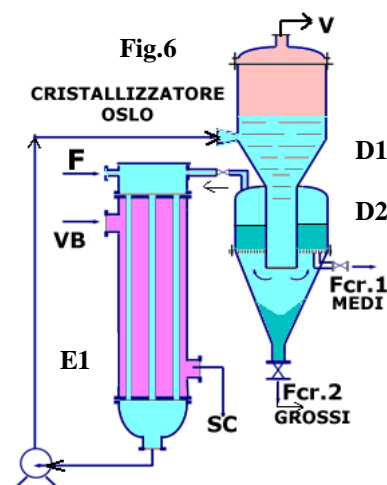
2) Cristallizzatori ad EVAPORAZIONE a circolazione forzata:

CRISTALLIZZATORE OSLO- fig.6

Il cristallizzatore ad evaporazione più comunemente impiegato è il cristallizzatore Oslo.

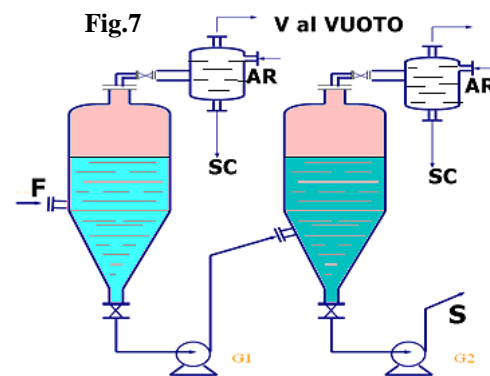
E' costituito da un evaporatore a circolazione forzata con fascio tubiero esterno. La soluzione da cristallizzare entra da F, attraversa tutto lo scambiatore E1, e tramite la pompa G1, viene immessa nell'evaporatore D1; il vapore prodotto si allontana da V, mentre la soluzione sovrasatura passa nel separatore sottostante D2 da dove è costretta a risalire attraverso un letto di cristalli che continuano ad ingrossarsi.

I cristalli più piccoli vengono trascinati dalla corrente e riciclati, i cristalli più grossi si scaricano da F2. VB e SC rappresentano l'ingresso del vapore e l'uscita della condensa nel riscaldatore. Si può lavorare anche sotto vuoto.



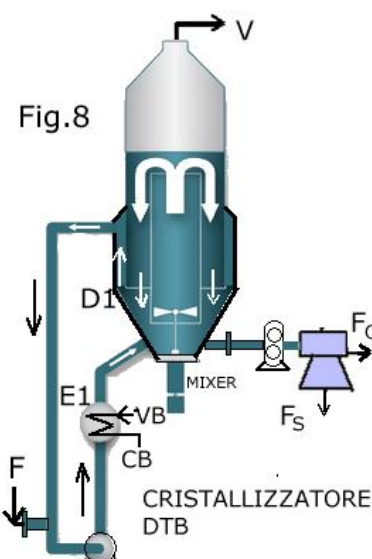
3) Cristallizzatori SOTTO VUOTO- fig.7:

si basano sul principio della evaporazione **flash**, (diminuzione di pressione). Infatti, facendo passare una soluzione satura al punto di ebollizione in un ambiente a pressione inferiore, creata da un sistema di aspirazione sotto vuoto di vapori e incondensabili, questa si troverà in una condizione di surriscaldamento. Quindi la soluzione tenderà immediatamente e contemporaneamente ad **evaporare** e a **raffreddarsi**. Infatti, essendo il processo adiabatico, il calore latente di vaporizzazione sarà fornito dalla soluzione liquida che si dovrà raffreddare. Quindi si avrà contemporaneamente una evaporazione ed un raffreddamento con conseguente cristallizzazione del soluto. Questi cristallizzatori sono di forma cilindrica a fondo conico; possono anche funzionare anche a **stadi multipli**, in questo caso si avrà una diminuzione di temperatura e grado di vuoto passando da uno stadio all'altro .

**4) Cristallizzatore A TURBOLENZA DTB [Draft Tube and Baffle] – fig.8:**

tipo ad **evaporazione-**

la circolazione è assicurata da un'elica a flusso assiale intubata che spinge la soluzione verso l'alto, mentre all'esterno del cristallizzatore vero e proprio vi è una corona circolare in cui la soluzione esausta discendente risale a bassa velocità, consentendo la sedimentazione dei cristalli, che vengono risucchiati dal flusso discendente. Parte di soluzione è riciclata per l'accrescimento, con riscaldamento in E1. Si ottiene così un controllo quasi perfetto di tutti i parametri della cristallizzazione.

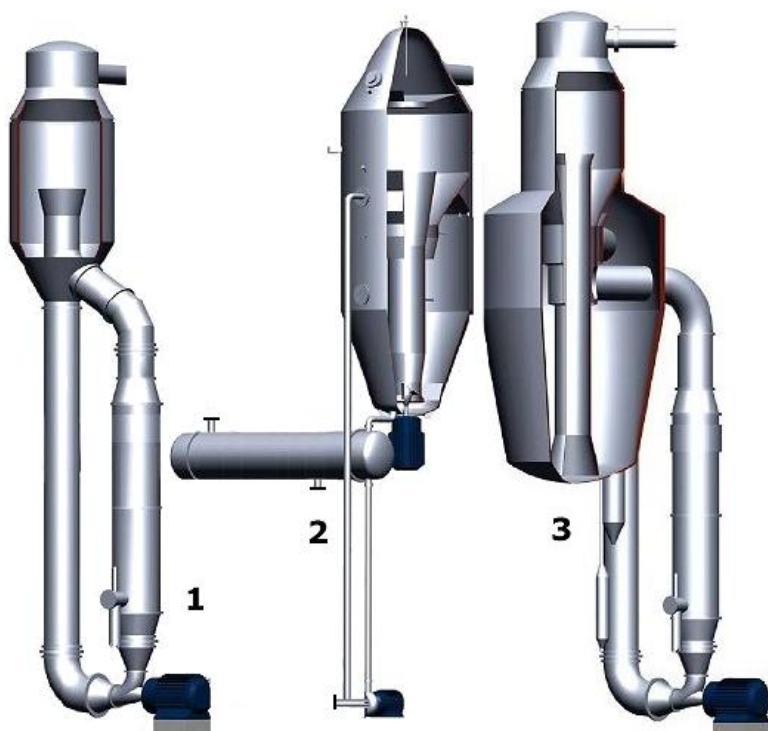


[[INDICE](#)]

APPENDICE

CRISTALLIZZATORI:

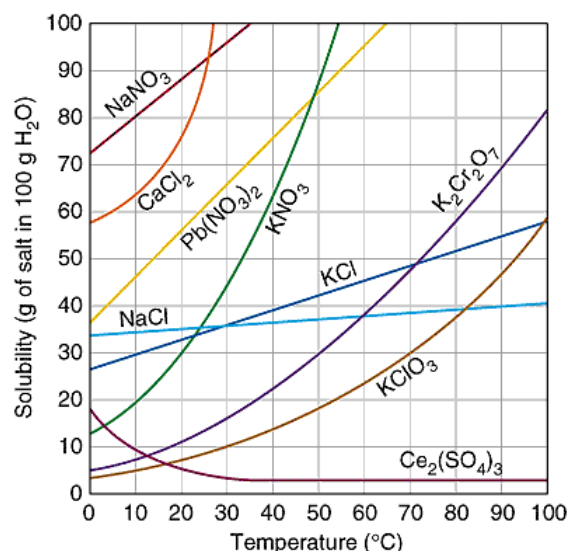
- 1 –cristallizzatore a circolazione forzata;
 - 2 –cristallizzatore DTB a turbolenza;
 - 3 –cristallizzatore Oslo;
- (by Messo Chemietechnik, Germany)

**DIAGRAMMA SOLUBILITÀ DI SALI:**

variazione della saturazione della soluzione in funzione della temperatura; i punti della curva rappresentano la condizione di saturazione, cioè la massima solubilità del soluto ad una certa temperatura.

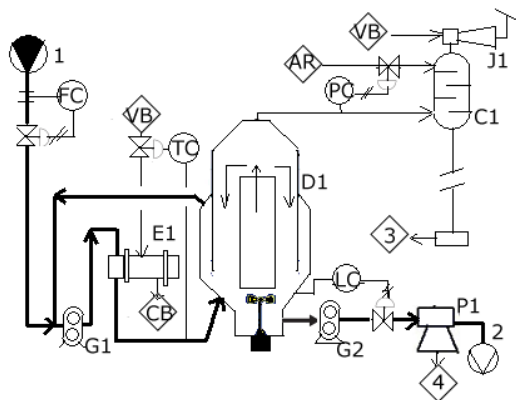
1-(MgSO₄, KNO₃...) la solubilità aumenta nettamente con la temperatura perché la solubilizzazione è endotermica;

2-(NaCl, KCl...)la solubilità varia in modo trascurabile con la temperatura perché la solubilizzazione è atermica;



[[INDICE](#)]

SCHEMA DI PROCESSO CRISTALLIZZATORE DTB:



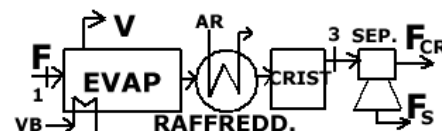
- LEGENDA APPARECCHIATURE:
 E1 RISCALDATORE
 D1 CRISTALLIZZATORE
 P1 CENTRIFUGA
 C1 CONDENSATORE A MISCELA
 J1 EIETTORE
 G1,2 POMPE ROTATIVE

- LEGENDA MATERIALI:
 1 ALIMENTAZIONE
 2 CRISTALLI
 3 CONDENSE
 4 SOLUZIONE SATURA

[INDICE]

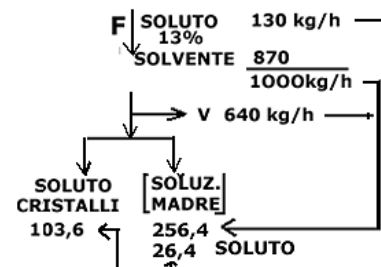
ESERCIZI SU CRISTALLIZZAZIONE

***ES.1 – EVAPORAZIONE + RAFFREDDAMENTO - K-bicromato** – sale anidro
 soluzione K-bicromato (1) $F=1000 \text{ kg/h}$ $cf=13\%$, sottoposta a cristallizzazione per evaporazione, con produzione (2) di $V = 640 \text{ kg}$ solvente; quindi viene raffreddata a $T_2=20^\circ\text{C}$ raggiungendo (3) una **solubilità** $\gamma=0,39 \text{ moli}/100\text{g H}_2\text{O}= 11,46\text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$; determinare quantità di cristallizzato e resa.

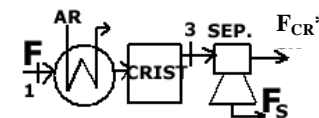


Soluzione:

posto F =alimentaz., conc. cf [in massa]; F_{CR} =cristalli solidi; F_S =soluz.saturo, conc. cs ;
 alimentazione: massa soluto = $F \cdot cf = 130 \text{ kg}$; massa solvente: $F \cdot (1-cf) = 870 \text{ kg}$;
 solvente evaporato: $V=640 \text{ kg}$;
bilanci- globale: (a) $F = F_S + F_{CR} + V$; (b) soluto: $F \cdot cf = F_S \cdot cs + F_{CR}$;
 \rightarrow conc. $cs = 11,46 / (11,46 + 100) = 0,103 = 10,3\%$;
 da (a): $F_S = F - F_{CR} - V$ sostit.in (b): $F \cdot cf = [F - F_{CR} - V] \cdot cs + F_{CR}$; $F_{CR}[1-cs]=F[cf-cs]+Vcs$;
sale cristallizzato: $\rightarrow F_{CR} = 103,6 \text{ kg/h}$; acque madri: $F_S = 256,4 \text{ kg/h}$;
 resa $\eta = [F_{CR} / F \cdot cf] \times 100 = 103,6 / 130 \times 100 = 79,7\%$.

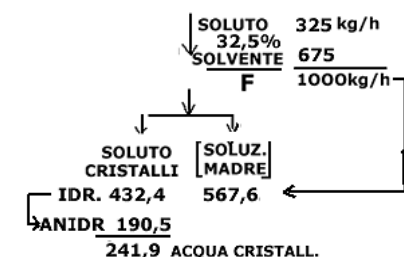


***ES.2 – RAFFREDDAMENTO - Na solfato** – sale idrato
 soluzione Na solfato: (1) $F=1000 \text{ Kg/h}$, sale $cf=32,5\%$, raffreddato da 60° a 27°C , raggiungendo (2) una **solubilità** $\gamma=31\text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$, e cristallizzando (3) in sale decaidrato (P.M.sale anidro=142g/mol, P.M.idrato=322g/mol); determinare le quantità di sostanze uscenti e il rendimento del processo.



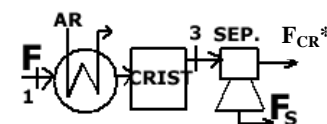
Soluzione:

posto F_{CR}^* = sale decaidrato, F_{CR} =sale anidro;
 (1): sale soluto $1000 \times 0,325 = 325 \text{ Kg}$; solvente= $1000-325 = 675 \text{ Kg}$;
 (3): frazione uscente dal crist. $cs = 31 / (31+100) = 0,237 = 23,7\%$;
 (a) bilancio globale: $F = F_S + F_{CR}^*$;
 (b) bil.idrato/anidro: $F_{CR}^* = k F_{CR} = F_{CR} (P.M._{ID}) / (P.M._{AN})$; $k = 322 / 142 = 2,27$;
 (c) bil.soluto: $F \cdot cf = F_S \cdot cs + F_{CR}$;
 da(a) $\rightarrow F_S = F - F_{CR}^*$; posto in bil.soluto (c): $F \cdot cf = [F - F_{CR}^*] \cdot cs + F_{CR}$; $F \cdot cf = [F - F_{CR}^*] \cdot cs + F_{CR}^* / k$; da cui:
 $F \cdot cf \cdot k = [F - F_{CR}^*] \cdot k \cdot cs + F_{CR}^*$; $F \cdot cf \cdot [k - cs] = F_{CR}^* [1 - k \cdot cs]$;
sale idrato $\rightarrow F_{CR}^* = 432,4 \text{ kg/h}$; sale anidro $\rightarrow F_{CR} = F_{CR}^* / k = 190,5 \text{ kg/h}$;
acque madri $F_S = F - F_{CR}^* = 567,6 \text{ kg/h}$; acque madri = soluto residuo + solvente; \rightarrow solvente= $567,6 - 190,5 = 377 \text{ kg/h}$;
 sale idrato = sale + acqua cristallizzaz.; \rightarrow acqua cristallizzaz. = $432,4 - 190,5 = 242 \text{ kg/h}$;
 rendimento $\eta = [F_{CR} / F \cdot cf] \times 100$; $\eta = 190,5 / 325 \times 100 = 58,5\%$.



***ES.3 – RAFFREDDAMENTO - Na solfato** - sale idrato

soluzione Na solfato: (1) $F=300 \text{ Kg/h}$, sale $cf=17\%$, raffreddato da 60° a 10°C , raggiungendo (2) una **solubilità** $\gamma=8,9\text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$, e cristallizzando (3) in sale decaidrato (P.M.sale anidro=142g/mol, P.M.idrato=322g/mol); determinare le quantità di sostanze uscenti, e il rendimento del processo.



Soluzione: posto F_{CR}^* = sale decaidrato, F_{CR} = sale anidro;

(1): sale soluto $300 \times 0,17 = 51 \text{Kg}$; solvente=249 Kg;

(2): frazione uscente dal crist. $cs = 8,9/(8,9+100) = 0,082 = 0,082 = 8,2\%$;

(a) bilancio globale: $F = F_S + F_{CR}^*$;

(b) bil.idrato/anidro: $F_{CR}^* = k F_{CR} = F_{CR} (P.M._{ID})/(P.M._{AN})$; $k = 322/142 = 2,27$;

(c) bil.soluto: $F_{cf} = F_S CS + F_{CR}$;

da(a) $\rightarrow F_S = F - F_{CR}^*$; sostit. in bil.soluto (c): $F_{cf} = [F - F_{CR}^*] CS + F_{CR}^*/k$; da cui:

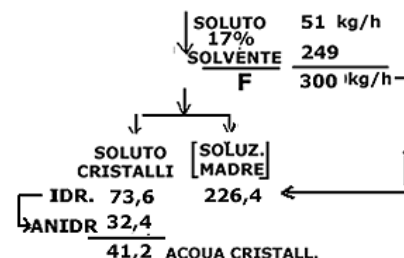
$F_{cf} k = [F - F_{CR}^*] k CS + F_{CR}^*$; $F k [cf - cs] = F_{CR}^* [1 - k CS]$;

sale idrato $\rightarrow F_{CR}^* = 73,6 \text{ kg/h}$; sale anidro $\rightarrow F_{CR} = F_{CR}^*/k = 32,4 \text{ kg/h}$;

acque madri $F_S = F - F_{CR}^* = 226,4 \text{ kg/h}$; acque madri = soluto residuo + solvente; \rightarrow solvente = $226,4 - 32,4 = 194 \text{ kg/h}$;

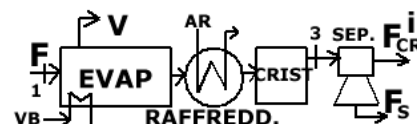
sale idrato = sale + acqua cristallizzaz.; \rightarrow acqua cristallizzaz. = $73,6 - 32,4 = 41,2 \text{ kg/h}$;

rendimento $\eta = [F_{CR} / F_{cf}] \times 100$; $\eta = 32,4/51 \times 100 = 63,5\%$.



***ES.4 – EVAPORAZIONE +RAFFREDDAMENTO - Na solfato - sale idrato**

Dati come l'esercizio precedente, produzione di sale idrato, con evaporazione del 5% del solvente iniziale; determinare le quantità di sostanze uscenti, e il rendimento del processo.



Soluzione: posto F_{CR}^* = sale decaidrato, F_{CR} =sale anidro;

(1): sale soluto $300 \times 0,17 = 51 \text{Kg}$; solvente=249 Kg;

(2): vapore $V = 249 \times 0,05 = 12,45 \text{ kg}$

(3): frazione uscente dal crist. $cs = 8,9/(8,9+100) = 0,082 = 8,2\%$;

(a) bilancio globale: $F = F_S + F_{CR}^* + V$;

(b) bil.idrato/anidro: $F_{CR}^* = k F_{CR} = F_{CR} (P.M._{ID})/(P.M._{AN})$; $k = 322/142 = 2,27$;

(c) bil.soluto: $F_{cf} = F_{CR} + F_S CS$;

da (a) e (b): $F = F_S + k F_{CR} + V$; da (c) $F_{cf} - F_S CS = F_{CR}$;

e sostituendo nella precedente: $F = F_S + k [F_{cf} - F_S CS] + V$;

da cui ricavo: $F_S [1 - k CS] = F[1 - kcf] - V$

acque madri $\rightarrow F_S = 211,1 \text{ kg/h}$; sale anidro: $F_{CR} = F_{cf} - F_S CS = 33,7 \text{ kg/h}$;

sale idrato $F_{CR}^* = k F_{CR} = 76,45 \text{ kg/h}$; (maggiore del caso precedente).

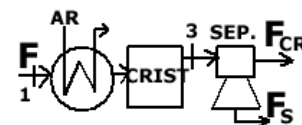
sale idrato: sale + acqua cristallizzaz.; \rightarrow acqua cristallizzaz. = $76,45 - 33,7 = 42,8 \text{ kg}$;

acque madri = $211,1 \text{ kg}$ = soluto residuo + solvente; \rightarrow soluto residuo = $51 - 33,7 = 17,3 \text{ kg}$; \rightarrow solvente = $193,8 \text{ kg}$;

rendimento $\eta = [F_{CR} / F_{cf}] \times 100$; $\eta = 33,7/51 \times 100 = 66,1\%$ (maggiore del caso precedente).

***ES.5 – RAFFREDDAMENTO - Na nitrato – sale anidro**

Dati: alimentazione $F = 100 \text{ kg}$, concentrazione sale $cf = 52\%$ peso; per raffreddamento a 10°C si ha soluzione satura al $44,5\%$; determinare peso di sale anidro cristallizzato; resa del processo.



Soluzione:

$F = 100 \text{ kg}$; $cf = 0,52$; sale soluto = $F_{cf} = 52 \text{kg}$; solvente = 48 kg ; F_{CR} = sale anidro; $cs = 0,445$;

bilanci- (a) generale: $F = F_S + F_{CR}$; (b) soluto: $F_{cf} = F_S CS + F_{CR}$;

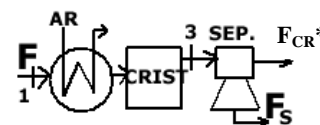
sostituendo in (b) si ottiene: $F_{cf} = [F - F_{CR}] CS + F_{CR}$; $F_{CR} [1 - CS] = F[cf - cs]$;

sale anidro: $\rightarrow F_{CR} = 13,5 \text{ kg}$; acque madri $\rightarrow F_S = 100 - 13,5 = 86,5 \text{ kg}$;

rendimento $\eta = [F_{CR} / F_{cf}] \times 100$; $\eta = 13,5/52 \times 100 = 26\%$

***ES.6 – RAFFREDDAMENTO - Na tiosolfato – sale idrato**

Dati: alimentazione $F = 100 \text{ kg}$, concentrazione sale $cf = 60\%$ peso; per raffreddamento a 20°C si ha soluzione satura a solubilità $\gamma = 70 \text{g}/100 \text{gH}_2\text{O}$, sale pentaidrato, $P.M._{AN} = 158,1 \text{g/mol}$, $P.M._{IDR} = 248,18 \text{g/mol}$; determinare peso di sale anidro cristallizzato; resa del processo.



Soluzione:

$F = 100 \text{ kg}$; $cf = 0,60$; sale soluto = $F_{cf} = 60 \text{kg}$; solvente = 40 kg ; F_{CR} = sale anidro; F_{CR}^* = sale idrato;

$cs = 70/(70+100) = 0,412 = 41,2\%$;

(a) bilancio globale: $F = F_S + F_{CR}^*$;

(b) bil.idrato/anidro: $F_{CR}^* = k F_{CR} = F_{CR} (P.M._{ID})/(P.M._{AN})$; $k = 248,18/158,1 = 1,57$;

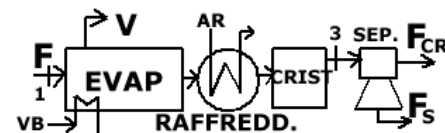
(c) bil.soluto: $F_{cf} = F_S CS + F_{CR}$;

come per es.precedenti, per sostituzione si ricava

sale idrato: $F_{CR}^* = F k [cf - cs] / [1 - k CS] = 83,6 \text{kg}$; acque madri $\rightarrow F_S = 16,4 \text{ kg}$.

***ES.7– EVAPORAZIONE + RAFFREDDAMENTO - K bicarbonato – sale anidro**

soluzione (1) $F=100 \text{ kg/h}$ sale conc.cf=15%, sottoposta a cristallizzazione per evaporazione, con produzione (2) di $V = 50 \text{ kg}$ solvente; quindi viene raffreddata a $T_2=20^\circ\text{C}$ raggiungendo (3) una **solubilità** cs =10,5% peso; determinare quantità di sale anidro cristallizzato e resa.

**Soluzione:**

posto F =alimentaz., conc.cf [in massa]; F_{CR} =cristalli solidi; F_S =soluz.satura, conc. cs ;

alimentazione: massa soluto = $F * cf = 15 \text{ kg}$; massa solvente: $F * (1-cf) = 85 \text{ kg}$;

solvente evaporato: $V=50 \text{ kg}$; conc. $cs = 0,105$;

bilanci- globale: (a) $F = F_S + F_{CR} + V$; (b) soluto: $F * cf = F_S * cs + F_{CR}$;

da (a): $F_S = F - F_{CR} - V$ sostit.in (b): $F * cf = [F - F_{CR} - V] * cs + F_{CR}$; $F_{CR}[1 - cs] = F[cf - cs] + V * cs$;

sale cristallizzato: $\rightarrow F_{CR} = 10,9 \text{ kg}$; acque madri: $F_S = 39,1 \text{ kg}$;

resa $\eta = [F_{CR} / F * cf] * 100 = 10,9/15 * 100 = 73\%$.

[[INDICE](#)]