

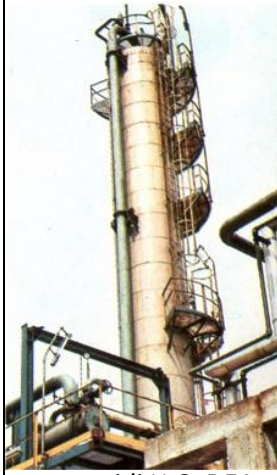
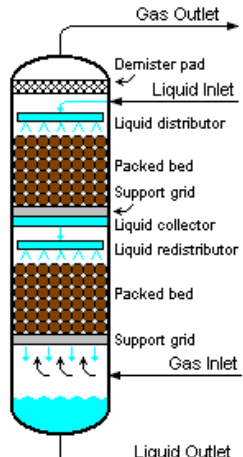
# LEZ.04 - principi di ASSORBIMENTO GAS-LIQUIDO

Versione base

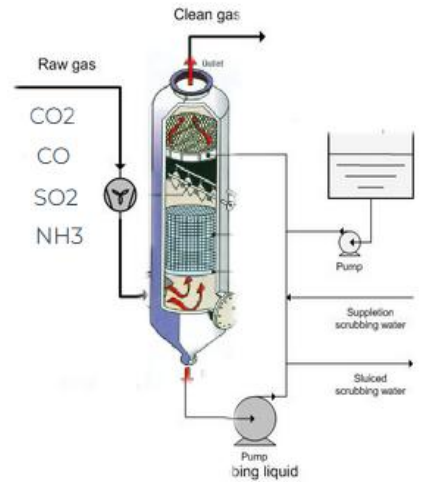
**APPLICAZIONI INDUSTRIALI:** - assorbimento gas/liquido - [vedi filmati]



LAVAGGIO GAS ESAUSTI



gas acidi H<sub>2</sub>S+DEA



NH<sub>3</sub> + acqua; CO<sub>2</sub> + DEA; gas acidi H<sub>2</sub>S SO<sub>2</sub>+ DEA; assorbimento di HCl, NO<sub>x</sub>, vapori di solventi, gas da verniciatura,.....

■ **DEFINIZIONE:** Operazione unitaria trasf.massa [contatto tra fasi/equilibrio/separazione] uno (o piu') componenti di una miscela gassosa vengono disciolti in un liquido; il componente assorbito (soluto) viene recuperato dal liquido mediante un processo di distillazione o stripping, con ricircolo di solvente (vedi diagramma a blocchi);  
se tra soluto e solvente avvengono reazioni si parla di **assorbimento chimico** (vedi ind.ac.nitrico, solforico, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, idrogeno solforato da miscele idrocarburiche, rimozione di CO<sub>2</sub> dai gas di sintesi...), altrimenti si parla di **lavaggio del gas** (assorb. fisico - reversibile).

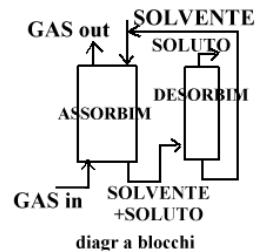


diagramma a blocchi

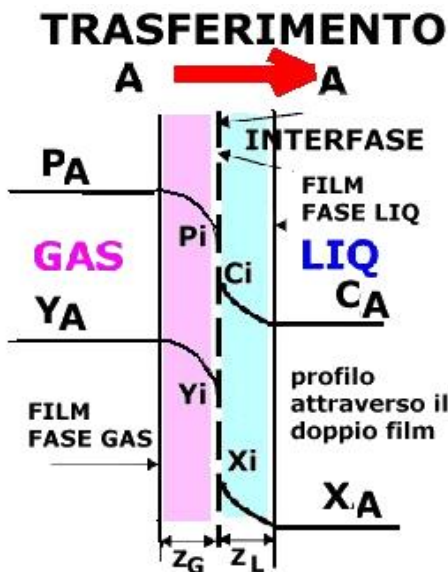
■ **FATTORI di processo-** l'assorbimento di soluto gas in un liquido è favorito da:

T<: basse temperature -

p>: processo in pressione -

controcorrente con solvente selettivo, economico, inerte chimicamente e poco corrosivo, scarsamente volatile, a bassa viscosità.

■ **PRINCIPI TEORICI:** ► modello del doppio film [no reaz.chimica]



- 1- **contatto** opportuno tra fase gassosa e liquida, non in equilibrio; creazione di **strato di interfaccia** (moto laminare/stagnante) tra due fasi in stato turbolento;

- 2- **trasferimento** di **soluto A** fino al raggiungimento dell'equilibrio;

forze spingenti: lato GAS [press.]  $\Delta p = p_A - p_{Ai}$ ;  $\Delta y = y - y_i$ ;

lato LIQ [conc.]  $\Delta C = C_{Ai} - C_A$ ;  $\Delta x = x_i - x$ ;

Le due fasi in contatto all'interfaccia tenderanno alle condizioni di equilibrio descritte dalla legge di **Henry** sulla SOLUBILITA' di soluto gas [A] in un liquido.

$$p_{Ai} = H \cdot C_{Ai} = H \cdot C \cdot x_{Ai}; \text{ nel gas: } p_{Ai} = P y_{Ai};$$

**IPTESI:** soluz. liquide diluite (attiv.γ=1), soluz. gassose diluite ideali (p bassa);

[H cost. Henry (= press/conc); C: dens.molare, conc.in mol/dm<sup>3</sup>; y/x fraz.moli]

quindi sostituendo  $\rightarrow y_{Ai} = x_{Ai} H \cdot C / P$  si ottiene

$$y_{Ai} = k x_{Ai} \text{ (relaz. equilibrio)}$$

$$k = H \cdot C / P \text{ cost. di ripartizione soluto A tra gas e liquido;}$$

$$P_{Ai} = P Y_{Ai} \quad P_{Ai} = H C X_{Ai}$$

EQUILIBRIO INTERFACCIA [HENRY]

$$Y_{Ai} = K X_{Ai}$$

[vedi Es.]

=> **problema:** calcolo P<sub>A</sub>P; C<sub>A</sub>; X<sub>A</sub>; **Quantità di gas assorbibile** [ovv. **dimensionam.** apparecchiatura di assorbimento]

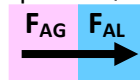
=> **soluzione:** uso **equazioni di trasferimento** di materia e **di bilancio**. [simil scambio termico]

→ **equazioni di trasferimento** di materia [FLUSSO] = **diffusione** del soluto A da ► GAS/INTERFACCIA/LIQ:

**legge FICK** = il **flusso di materia** del **soluto A** da gas nel liq. è proporzionale al **gradiente di concentrazione**;

**TEORIA:** [(\*)] simil. Eq. flusso calore per convez  $Q = h \text{ Sup } \Delta T$  / conduz attraverso sup.  $Q = k \text{ Sup. } \Delta T / s$  / più pareti  $Q = U \text{ Sup } \Delta T$

• diffusione **lato liq:**  $N_S = \frac{D_L * (C_{Ai} - C_A)}{Z_L}$  [è una portata: p.es.  $N_A = \text{moli/h.m}^2$ ]



con  $N_S$ : quantità soluto/sup./t;  $D_L$ =coeff.diff.soluto gas nella fase liquida;  $\Delta C$ =variaz.conc.;  $Z_L$ =spessore film lato liq; essendo lo **spessore** di difficile calcolo si usa **coeff.diffusione  $K_L$**  =  $D_L / Z_L$  [valori sperimentali; cfr.formula calore per convez.].

quindi: ►  $N_S = K_L * (C_{Ai} - C_A)$  [ $K_L$  = coeff. diff. lato liq]

• diffusione lato gas: ►  $N_S = K_G * (p - p_i)$  [ $K_G$  = coeff. diff. lato gas]

**a regime**, flusso **costante**,  $N_S = K_L * (C_{Ai} - C_A) = K_G * (p - p_i)$ ;  $K_G / K_L = (C_{Ai} - C_A) / (p - p_i)$ ;

si può definire un **coeff. trasferimento globale  $U_G$** , da sin. a destra nel doppio film G→L (\*):

$1/U_G = 1/K_G + H/K_L$ ; [che interessa entrambi i flussi relativi ai film stagnanti fase gas e fase liquida.]

Flusso di soluto A: [FICK]  
 $N_A = \text{Sup. } U_G (P_A - P_A^*)$   
 $N_A = \text{Sup. } U_G (Y_A - Y_A^*)$   
 $N_A = \text{Sup. } U_L (C^* - C_A)$   
 $N_A = \text{Sup. } U_L (X^* - X_A)$   
**all'equil.:**  
 $P_A^* = K X_A$  ;  $Y_A^* = K X_A$

**CONCLUSIONI:** GAS // INTERFACCIA // LIQ [cfr.formule precedenti]

Nella legge di Henry  $p_{Ai} = H * C_{Ai} = H * C * x_{Ai}$ , la quantità  $H * C$  rappresenta la **pressione VIRTUALE in equilibrio con la massa liquida di concentrazione C**, indicandola con  **$p^*$** , l'equazione di trasferimento si esprime in funzione di  $U_G$  e della forza spingente complessiva, data dalla differenza tra la pressione  $p$  nella massa del gas e  **$p^*$**  =  $K * X_A$  all'equilibrio con la composizione  $C [X_A]$  del liquido:

[similmente per  $U_L$ ] **QUINDI, considerando le forze spingenti:**

lato gas:  $N_S = U_G * (p - p^*)$  = portata gas soluto trasferito/unità sup.

[GAS→INTERFACCIA/LIQ]

lato liq:  $N_S = U_L * (C^* - C)$ ; (kmoli/h.m<sup>2</sup>conc.) con  $1/U_L = 1/K_L + 1/(H * K_G)$

[INTERFACCIA→LIQ]

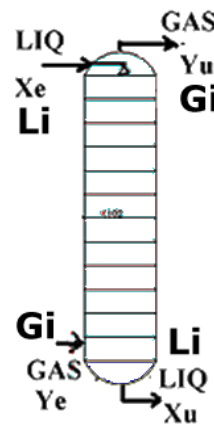
[(\*)]  $Q = h * A * \Delta T$  tra 2 fluidi attrav parete piana  $Q = U_c A \Delta T$  [ $U_G$ : kmol/(h · m<sup>2</sup> · kPa);...]

Esprimendo ambedue in frazioni molari o rapporti molari si ottiene:

$N_S = U_L * (y - y^*)$  frazioni molari riferite al gas  $N_S = U_X * (x^* - x)$  frazioni molari riferite al liquido

$N_S = U_Y * (Y - Y^*)$  rapporti molari riferite al gas  $N_S = U_X * (X^* - X)$  rapporti molari riferite al liquido

$U_Y$ : kmol/(h m<sup>2</sup> fraz.mol); [► cfr. **esercizi**;  $P^* = K X_A$ ;  $Y^* = K X_A$ ]



**DIMENSIONAMENTO COLONNA di ASSORBIMENTO**

- alimentazione gas **G** (A soluto; B non soluto gas),
- liquido **L** (solvente immiscibile con B, eventualmente contenente già A);
- assorbimento **multistadio continuo** in controcorrente.

► **IPOTESI: IMMISCIBILITA' tra diluente (non soluto gas B) e solvente**

**CONSEGUENZE:**

con questi dati le correnti di **non soluto gas  $G_i$**  (oppure B) e **liquido solvente  $L_i$**  si comportano da **inerti**, cioè con **portata costante**, e solo il **soluto (A)** viene scambiato tra le due correnti (cambia quindi solo la **composizione** nei vari stadi).

Vengono introdotte quindi non frazioni molari, ma **RAPPORTI MOLARI**, o **concentrazioni in "RAPPORTO"**, basate su **quantità costanti** delle portate di **inerti**, definite come segue:

$Y = y / (1 - y)$ ;  $Y = (\text{moli A} / \text{moli inerte } G_i)_{G_i}$ ;  $y$  fraz. molare fase gas

$X = x / (1 - x)$ ;  $X = (\text{moli A} / \text{moli inerte } L_i)_{L_i}$ ;  $x$  fraz. molare fase liq

La condizione di equilibrio sarà ⇒  $Y = K * X$ ; opp.  $y = k * x$ ;

**LEGENDA:**

A soluto;  **$G_i$**  non soluto gas [ovv.B]  
 L solvente;  **$L_i$**  parte inerte di L, insolub con B  
 e=entrata; u=uscita; i= inerte;  
 GAS<sub>E</sub>: A+ $G_i$ ; Y<sub>E</sub>; LIQ<sub>E</sub>: Li (+/- A) X<sub>E</sub>;  
 GAS<sub>U</sub>:  $G_i$ +A; Y<sub>U</sub>; LIQ<sub>U</sub>: Li+A; X<sub>U</sub>;

■ **BILANCIO DI MATERIA:** **soluto** entrante = **soluto** uscente; [VEDI colonna in FIG.]



►  $G_i Y_e + L_i X_e = G_i Y_u + L_i X_u$  e raccogliendo: →  **$G_i (Y_e - Y_u) = L_i (X_u - X_e)$**  (\*)

(N.B. spesso  $X_e = 0$  solv entrante puro)

[(cfr.prec.proc.) tra testa e piatto gen. n:  $G_i Y + L_i X_e = L_i X + G_i Y_u$ ; →  $Y = X L_i / G_i + Y_u - X_e L_i / G_i$ ]

(\*) L'espressione precedente risulta una retta, chiamata **RETTA DI LAVORO**, rappresentante la relazione tra correnti **all'interstadio**, passante per i punti significativi **testa** ( $Y_u$ ;  $X_e$ ) e **coda** colonna ( $Y_e$ ;  $X_u$ ).

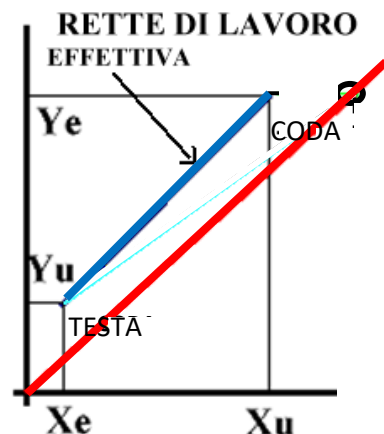
Nel diagramma risulta come retta di colore **BLU** -

► **RETTA/CURVA DI EQUILIBRIO;**  **$Y = k X$**  o tab X/Y-

Noto K, [se nota la retta:  $y = kx$  si passa alla retta  **$Y = K X$** ];

(retta di colore **ROSSO** - in fig)

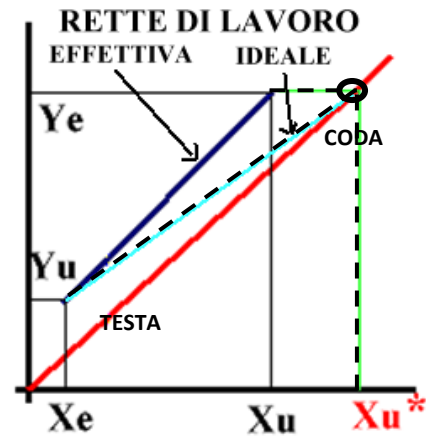
con portate di inerti gassosi  $G_i$  (non soluto) e liquidi  $L_i$  (solvente);



## DIMENSIONAMENTO

**DATI NOTI:** (con e=entrata; u=uscita; i=inerti)

- $Y_e$ ;  $Y_u$ ;  $X_e$  [se  $\neq 0$ ];
- **retta/curva di equilibrio  $Y=K X$ :**  
(retta di colore **ROSSO** in fig.,  $K$ = cost. di ripartizione);
- oppure tabella di valori all'equilibrio  $X_i/Y_i$ .
- Portate di inerti  $L_i$  (solvente) e  $G_i$  (GAS non soluto);
- determino la **condizione di pinch**: minima portata di **solvente** liquido  $L_i$  necessario all'operazione, massima di gas  $G_i$ , corrispondente a condizioni di **equilibrio** a entrata/uscita **codà** colonna, ma con  $N^\circ$  piatti infinito, corrispondente alla **intersezione della retta eq. con  $Y_e$** : [codà fittizia id.] retta di lavoro ideale con  $\blacktriangleright X_u^*$ ;  $\Rightarrow (L_i/G_i)_{min}$



la **condiz. operativa sarà quindi:**

$$(L_i/G_i)_{oper} = (Y_e - Y_u) / (X_u - X_e) = \beta \times (L_i/G_i)_{min} = \beta \times (Y_e - Y_u) / (X_u^* - X_e)$$

con  $\beta$ = valore superiore ad 1 (p.es. 1,64; maggiorazione 64% del rapp.min.) ricavato da considerazioni economiche ( $L_i$  maggiore = diminuisce il  $N^\circ$  stadi, vengono evitate condizioni di ingolfamento della colonna, ma aumenta il volume colonna e il costo solvente).

$\rightarrow$  l'incognita risulta  $X_u$ ;

**PROCEDIMENTO:**  $\Rightarrow$  calcolo di  $X_u$  e numero di **stadi di equilibrio**

**noto il Bilancio:**  $G_i (Y_e - Y_u) = L_i (X_u - X_e)$ ;

- 1 - noti  $Y_e$   $Y_u$   $X_e$ ;  $G_i$ ;  $L_i$ ; noto  $\beta$ ; eseguo le operazioni seguenti:
- 2 - **traccio** sul diagramma la **retta/curva di equilibrio** passante per il p.to di **ORIGINE** e per  $X_u^* = Y_e/K$  [calcolato];  $\Rightarrow \blacktriangleright X_u^* =$  **condizione di pinch**
- 3 - si considera il caso di "**minima**" (minima portata di **solvente**  $L_i$  necessario all'operazione) corrispondente alla zona di **uscita** del liquido, **codà** colonna, in condizioni ideali di **equilibrio** del liquido con l'entrata del gas = **retta di lavoro ideale**.

$\blacktriangleright$  calcolo retta id.:  $(L_i/G_i)_{min} = (Y_e - Y_u) / (X_u^* - X_e)$

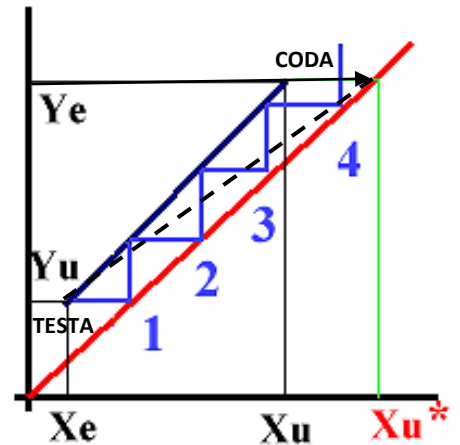
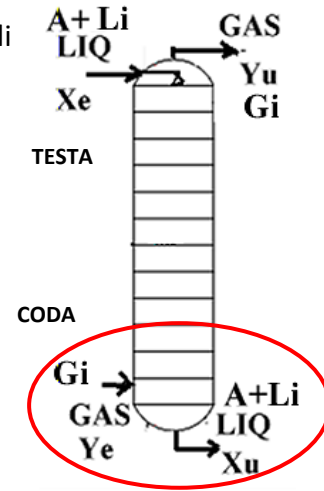
- 4 - si considera la condizione di **operatività**, e dal bil. materia calcolo  $X_u$ .

$$(L_i/G_i)_{oper} = (Y_e - Y_u) / (X_u - X_e) = \beta (L_i/G_i)_{min}$$

e ricavo per calcolo l'incognita  $\rightarrow X_u$ ,

- 5 - la riporto sul diagr. tracciando il punto **effettivo** di **CODÀ** colonna e quindi la retta di lavoro passante dai punti  $(Y_e; X_u)$  e  $(X_e; Y_u)$ ;

- 6 - Si esegue quindi il calcolo degli **stadi di equilibrio** graficamente (metodo McCabe Thiele), partendo dalla **TESTA COL.**, con la costruzione a gradini. [nella figura  $N_{teorici} = 4$ ; se efficienza di colonna è  $\eta$  (p.es.=60%)  $N_{reali} = N_t/\eta$ ].



$\blacktriangleright$  **N°STADI EQUILIBRIO- caso CURVA DI EQUILIBRIO** - p.es.  $\rightarrow$

|   |   |        |       |       |
|---|---|--------|-------|-------|
| X | 0 | 0,015  | 0,021 | ..... |
| Y | 0 | 0,0305 | 0,04  | ..... |

traccio per punti la curva di equilibrio;

noti  $Y_e$ ;  $Y_u$ ;  $X_e=0$ ; note le portate di inerti  $G_i$  (B),  $L_i$ ;

traccio la retta lavoro per condizione **pinch** (**tangente nel punto Q**):

leggo sul diagr.  $\rightarrow X^*$ ;  $Y^*$ ;

posto  $G_i$  e  $L_i$  portate di inerti gassoso e solvente liquido, sarà:

$$(L_i/G_i)_{operativo} = (Y_e - Y_u) / (X_u - X_e) =$$

$$= \beta (L_i/G_i)_{min} = \beta (Y^* - Y_u) / (X^* - X_e)$$

da cui ricavo  $\rightarrow X_u$ ;

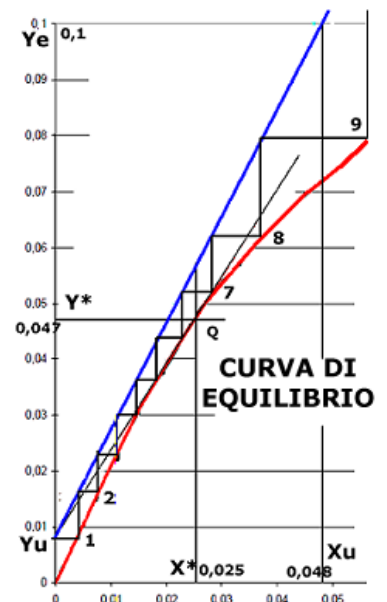
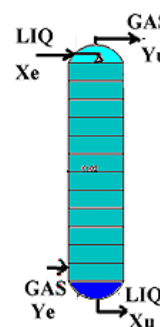
traccio la retta di lavoro effettiva tra i punti  $(Y_u; X_e)$  e  $(Y_e; X_u)$ :

e determino gli stadi teorici:  $\rightarrow N^\circ$  stadi= **9** [superando la conc.  $X_u$ ].

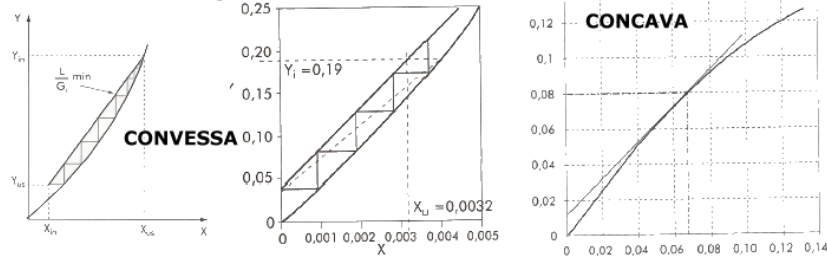
[vedi documento ESERCIZI a parte]

**EFFICIENZA DELLA COLONNA:**

$\rightarrow$  efficienza complessiva  $\eta = N_{reali} / N_{teorici}$



**CONDIZIONI DI PINCH  
TIPI CURVE DI EQUILIBRIO**



**APPARECCHIATURE:** (vedi anche **appendice**)

dispositivi industrialmente più usati:

**1- colonne di assorbimento a riempimento:**

il gas ed il liquido vengono in contatto in controcorrente, ricoprendo le superfici interne del materiale di riempimento, la cui funzione è aumentare la superficie di contatto liquido/gas. ;

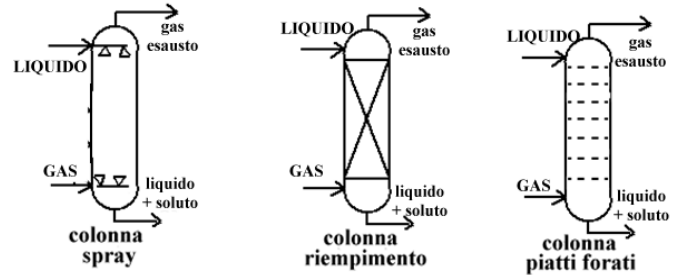
vantaggi: costo basso, basse perdite di carico, facile manutenzione, adatte per fluidi corrosivi, fluidi schiumogeni, per piccoli diametri e basse portate, migliore efficienza;

svantaggi: occorre molto liquido per bagnare il riempimento, usare distributore di liquido e gas e suddividere il materiale in più stadi, per evitare camini preferenziali;

**2 – colonne a piatti:**

vantaggi: indicate per alte portate, per portate variabili, per fluidi sporcanti, per scambi termici, svantaggi: costose e con bassa efficienza

**3 – colonne spray:** bassa efficienza ma basso costo



**N.B. FUNZIONAMENTO COLONNA A RIEMPIIMENTO:**

Una volta stabiliti la portata di solvente ed il tipo di riempimento, la variabile da tenere sotto controllo è la velocità del **gas**, da cui dipendono le perdite di carico lato gas. All'aumentare della velocità del gas aumenta l'**hold up (ritenzione)** del liquido e si riduce la sezione di passaggio del gas incrementando la perdita di **pressione** per unità di altezza  $\Delta P/z$ .

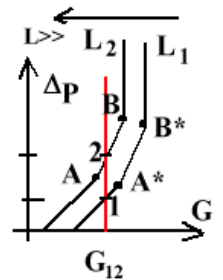
Per valori alti di G si ha un forte incremento di  $\Delta P/z$ , con cambio della curvatura della curva (in figura  $\Delta p$ /portata G, seg. A-B), identificato come condizione di **load point**; per ulteriori aumenti della velocità del gas la quantità di **liquido trattenuto** aumenta velocemente tendendo a riempire tutta la sezione disponibile, con **gorgogliamento** del gas nel liquido (cattivo assorbimento), → **flooding** (allagamento).

Per evitare che si verifichi tale condizione le torri vengono solitamente fatte funzionare in condizioni al di sotto del load point. Dall'esperienza tale condizione corrisponde a una velocità del gas di circa il 40-70% rispetto a quella che causa il **flooding** (allagamento);

Dal diagr:→punto **A** ingolfamento (ritenzione di liquido); **B** allagamento (flooding - gorgogliamento);

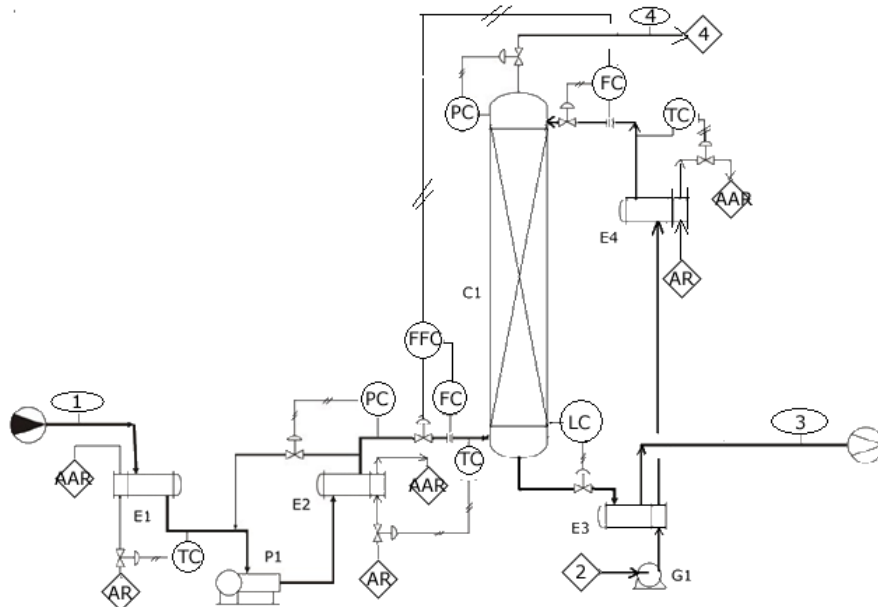
- caso 1/2: stessa quantità di Gas, aumento portata Liq. da  $L_1$  a  $L_2$ , aumento perdite di carico del Gas;

- caso A/B;  $A^*/B^*$ : stessa portata Liq, aumento portata Gas, aumento perdite di carico;



**SCHEMI DI PROCESSO:**

**1 - SCHEMA DI PROCESSO DI COLONNA DI ASSORBIMENTO**



**LEGENDA:**

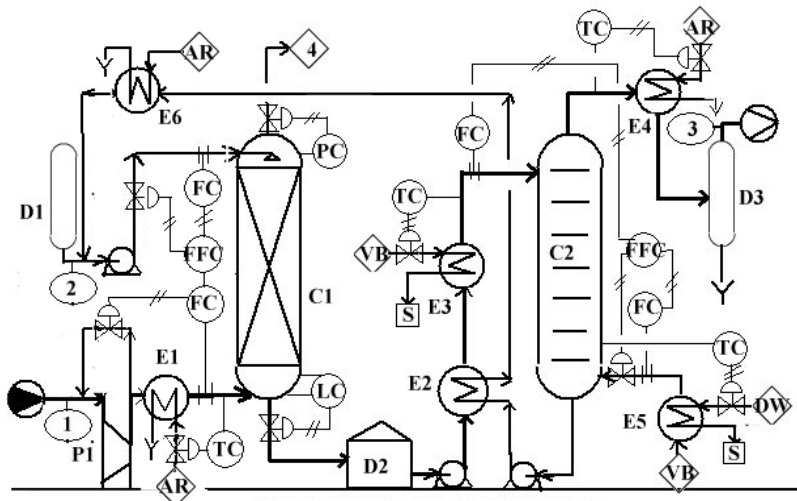
- 1 ALIMENTAZIONE
- 2 SOLVENTE RIGENERATO
- 3 PRODOTTO ASSORBITO
- 4 GAS ESAUSTO

- E1,2,4 RAFFREDDATORI
- E3 SCAMBIAATORE
- C1 COLONNA ASSORBIMENTO
- P1 COMPRESSORE
- FC CONTROLLO PORTATA
- FFC CONTROLLO IN RAPPORTO
- TC CONTROLLO TEMPERATURA
- PC CONTROLLO PRESSIONE
- LC CONTROLLO LIVELLO

- AR ACQUA DI RAFFREDDAMENTO
- ARR USCITA ACQUA AL RICIRCOLO



2 - ASSORBIMENTO C1 (LAVAGGIO) E DESORBIMENTO C2 (STRIPPAGGIO)



- LEGENDA MATERIALI:  
 1 GAS IN INGRESSO  
 2 SOLVENTE  
 3 SOLUTO (GAS O LIQUIDO)  
 4 GAS ESAUSTO USCENTE
- LEGENDA APPARECCHIATURE:  
 P1 COMPRESSORE GAS  
 D1 SERBATOIO SOLVENTE  
 E1,6 REFRIGERATORE  
 C1 COL.ASSORBIMENTO  
 D2 SERBATOIO LIQUIDO  
 E2,3 PRERISCALDATORE  
 C2 COL. STRIPPAGGIO  
 E4 CONDENSATORE  
 E5 SURRISCALDATORE  
 D3 SERBATOIO SOLUTO

by A.Tonini

**Descrizione impianto**

Si deve recuperare un soluto A da un gas che lo contiene allo stato di vapore, mediante lavaggio con un solvente C a bassa tensione di vapore, e successivo desorbimento (strippaggio) con condensazione del gas strippante e separazione del soluto (in forma gas o liquido). Le operazioni industriali chimiche che si applicano per ottenere il lavaggio (assorbimento) del gas e la separazione di A da C sono le seguenti:

- 1) Raffreddamento del gas in uno scambiatore raffreddatore ( E1 )
- 2) Assorbimento del soluto A in una colonna a riempimento, da parte del solvente ( C1 )
- 3) Strippaggio in colonna continua ( C2 ) dei due liquidi (A+C) che sono facilmente separati quasi puri per la loro differente tensione di vapore.

CONDIZIONI OPERATIVE:

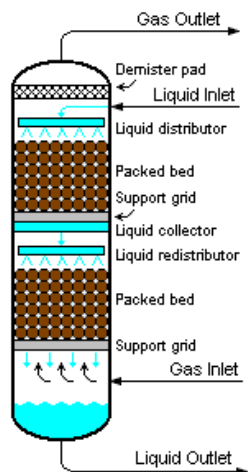
**ASSORBIMENTO:** bassa temperatura, conduzione in pressione, solvente selettivo con scarsa volatilità.

**STRIPPAGGIO** o desorbimento: alta temperatura, bassa pressione.

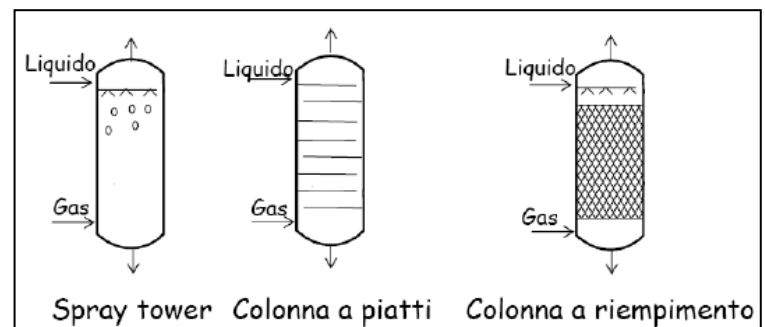
Il gas, depurato del componente "A", si recupera dalla testa della colonna e viene inviato al gasometro. Il processo di separazione di "A" dal gas è un processo continuo, poiché tale è evidentemente la produzione di gas.

Per la separazione di "A" da "C", la soluzione che si estrae dalla torre di assorbimento è immagazzinata nel serbatoio ( D2 ) dal quale è prelevata per essere inviata allo strippaggio continuo, che è tecnicamente facilitato dalla bassa tensione di vapore del liquido "C", che perciò è facilmente separabile da "A".

**APPENDICI:** -----  
**TIPI DI COLONNE DI ASSORBIMENTO**



**COLONNE A RIEMPIMENTO**



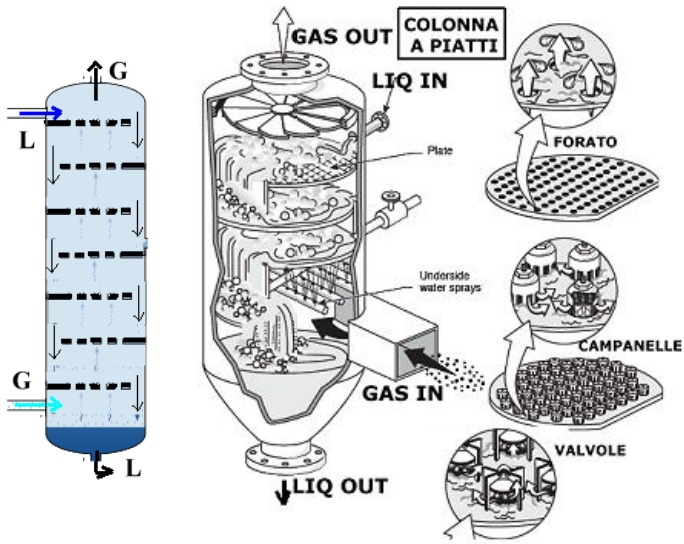
colonne a riempimento: materiali per disposizione casuale o strutturata



| MATERIALE DI RIEMPIMENTO ANELLI |          | DIMENSIONI mm | SUP.SPESIF. m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> | %VUOTO |
|---------------------------------|----------|---------------|--|--------|
| Selle Berl                      | Ceramica | 6             | 900  | 60     |
|                                 |          | 25            | 250  | 68     |
|                                 |          | 50            | 105  | 72     |
| Anelli Pall                     | metallo  | 25            | 205  | 157    |
|                                 |          | 50            | 115  | 66     |
|                                 |          | 90            | 92   | 53     |
| Anelli Raschig                  | plastica | 25            | 205  | 90     |
|                                 |          | 50            | 100  | 82     |
|                                 |          | 90            | 85   | 52     |
| Anelli Raschig                  | ceramica | 6             | 710  | 62     |
|                                 |          | 25            | 190  | 74     |
|                                 |          | 100           | 46   | 80     |
|                                 | acciaio  | 19            | 245  | 80     |
|                                 |          | 25            | 185  | 86     |
|                                 |          | 75            | 66   | 95     |



**COLONNA A PIATTI**



**COLONNA  
SPRAY  
ORIZZONTALE  
VERTICALE**

