

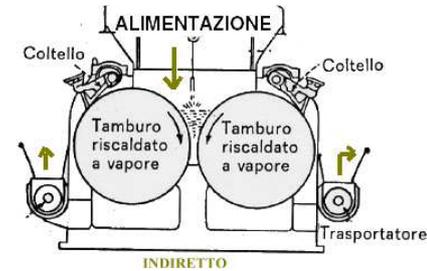
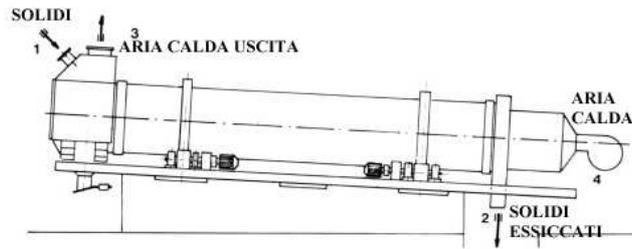
**1) GENERALITA':**

L'essiccamento è una operazione unitaria in cui un liquido viene allontanato da un solido per evaporazione verso un mezzo gassoso opportuno (operazione solido-gas).

USI: riduzione volume/peso di materiale, operazione di finissaggio prima di confezionamento e immagazzinamento; stabilizzazione di materiale; per materiali detergenti fertilizzanti farmaci alimenti, ind. pelle legno carta.

A seconda delle modalità di trasferimento di calore, l'operazione può essere effettuata in diversi modi:

- Essiccamento **diretto**: si usa aria calda a basso contenuto di umidità (essiccativa), posta a contatto diretto con il solido da essiccare; in alternativa all'aria si può usare gas inerti, o anche vapore surriscaldato, o fumi di combustione.
- Essiccamento **indiretto**: il calore viene trasmesso al solido attraverso una superficie di separazione calda; questa tecnica può essere vantaggiosa quando il vapore del liquido separato dal solido deve essere recuperato (solventi), o per materiali sotto forma di polveri. Per il riscaldamento può essere utilizzato vapore, fumi di combustione o resistenze elettriche, ecc.
- Essiccamento **radiante**: il calore viene fornito per irraggiamento.



I solidi possono contenere umidità essenzialmente in due forme:

- umidità libera, che può liberamente trasferirsi da e verso il solido;
- umidità legata, che è trattenuta da solido negli spazi capillari.

Quando un solido umido è posto a contatto con aria, si possono verificare i seguenti casi:

- $P_{VAP} > P_{H2O}$ : **umidificazione**; la pressione parziale del vapore contenuto nell'aria è superiore alla tensione di vapore dell'acqua del solido, alla temperatura a cui si trova il solido, → si ha un trasferimento di acqua dall'aria al solido, tramite condensazione del vapore.
- $P_{VAP} < P_{H2O}$ : **essiccamento**; la pressione parziale del vapore è inferiore alla tensione di vapore dell'acqua del solido, → si ha un trasferimento dell'acqua dal solido all'aria.

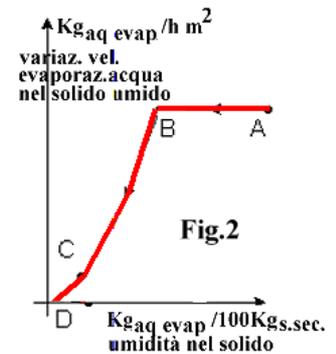
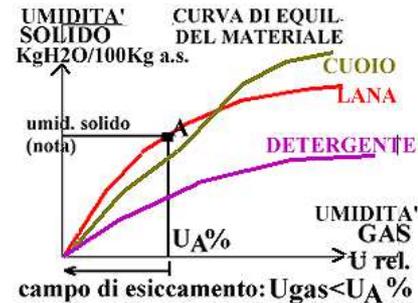
**Curve di essiccamento**

I processi di essiccamento presentano delle caratteristiche comuni descritte dalle curve di essiccamento.

Fig1.: curva di umidità di equilibrio solido/gas, caratteristica per ogni materiale: si ha essiccamento con gas di umidità % <  $U_A$ .

Fig2.: curva di velocità di essiccazione: la curva rappresenta la velocità di essiccamento in funzione dell'umidità associata al solido secco.

[In una prima fase la temperatura del solido varia sino a raggiungere le condizioni stazionarie; a questo punto la temperatura raggiunta sulla superficie del solido umido corrisponde alla temperatura di bulbo umido dell'aria essiccante. Raggiunta la condizione stazionaria, l'acqua comincia ad evaporare e la velocità rimane costante per tutto il tratto A-B. Superata un umidità critica, punto B, la velocità di essiccamento comincia a diminuire; questo avviene perché, essendo alcune parti del solido già relativamente prive di umidità, la superficie complessiva dell'interfase acqua-aria comincia a diminuire e con essa la velocità di evaporazione (tratto B-C). Questa fase (punto C) è caratterizzata da un aumento della temperatura del solido. Superato il punto C ci si avvicina alle condizioni di equilibrio e la velocità di essiccamento diminuisce sempre più rapidamente, a causa della difficoltà di diffusione dell'acqua all'interno del solido verso la superficie. Il processo di essiccamento è terminato quando l'umidità del solido raggiunge il valore di equilibrio].



**FATTORI CHE INFLUENZANO L'ESSICCAMENTO:**

- per il SOLIDO:
  - temperatura alta (e differenza di temperatura tra mezzo essiccante e materiale da essiccare);
  - tipo di solido (pezzatura, polveri grani, struttura cristallina/ amorfo,);
  - superficie di contatto;
- per il GAS:
  - temperatura alta, umidità relativa  $U_{rel}$  bassa, velocità  $v_{gas}$  alta; press bassa;

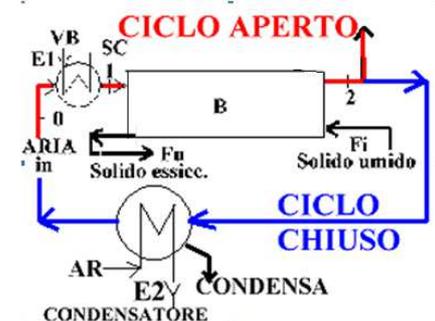
**TIPI DI ESSICCAMENTO:**

**A CICLO APERTO**

l'aria viene preriscaldata in E1, resa essiccativa (0-1), quindi inviata all'essiccatore B, da cui esce umida (1-2), e viene scaricata all'esterno; è il caso più semplice, meno costoso, utile nel caso di solido da essiccare contenente liquido acquoso.

**A CICLO CHIUSO**

l'aria viene preriscaldata in E1, resa essiccativa (0-1), quindi inviata all'essiccatore B, da cui esce umida (1-2), e viene inviata al condensatore E2, che separa il liquido dall'aria (2-0); l'aria quindi viene ricircolata al preriscaldatore E1.

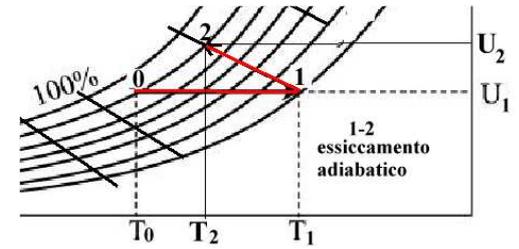


Questo sistema (ciclo chiuso) permette di usare gas essiccativi anche pregiati (azoto,...) e permette il recupero delle condense, importante nel caso che il solido da essiccare sia impregnato di solventi o sostanze che non possono essere scaricate all'esterno, e che sia economico reimpiagare.

## 2) BILANCI DI MATERIA ED ENERGIA per ESSICCAMENTO

### 2.1) ESSICCATORE MONOSTADIO (adiabatico)

I bilanci di energia e materia servono per calcolare la portata di aria da alimentare.  
(vedi schema a lato dell'essiccatore B)



#### ----BILANCI DI MATERIA:

(0-1): preriscaldamento aria per renderla **essiccativa**;

(1-2): **umidificazione** aria (ed essiccamento del solido umido);

bilancio: acqua assorbita da aria = acqua ceduta dal solido:

$$\text{Ga.s. } (U_2 - U_1) = F_i X_i - F_u X_u \quad \text{oppure} \quad \text{Ga.s. } (U_2 - U_1) = F (X_i^* - X_u^*)$$

Con Ga.s. portata aria secca Kg/h

U = umidità assoluta Kg vap/Kg A.S.

Fi/u = solido umido Kg/h in ingresso/uscita

Xi/uu = umidità % peso di solido ingresso/ uscita

F = solido secco Kg<sub>S.SEC.</sub>/h

X\*/i/u = umidità di solido ingresso/ uscita,

come Kg H<sub>2</sub>O/Kg S.SEC

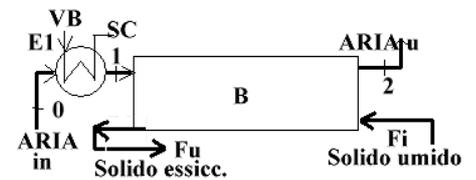
noti: T<sub>0</sub> T<sub>1</sub> T<sub>2</sub>; Fi Xi Xu ; U<sub>1</sub> U<sub>2</sub> ; → si determina Fu; e l'incognita Ga.s.

La portata G di **aria umida** da preriscaldare (nel p.to 0) e rendere essiccativa è data da:

**Ga.u.** = (Ga.s.) x (Vol umido) in m<sup>3</sup>/h oppure **Ga.u.** = Ga.s. + A.S. x U in Kg/h

con vol. specifico umido (dal diagr., nelle condizioni di ingresso (0)) **V<sub>u</sub>** = Va.s. + (Vsat.

- Va.s.) Urel (m<sup>3</sup>/Kg a.s.)



#### ----BILANCI DI ENERGIA:

a) quantità di calore necessario per rendere l'aria essiccativa (in E1: p.ti 0-1):

$$Q_{E1} = A.S. \cdot c_u (T_1 - T_0) \quad \text{Kcal/h} \quad (\text{con } c_u \text{ aria umida determinato per aria nelle condizioni (0)})$$

b) bilancio termico dell'essiccatore: calore assorbito dal solido = calore ceduto dall'aria (nell'essiccatore B)

$$F_{SEC} c_m (T_u - T_1) + F_{SEC} (X_i - X_u) [c_{H_2O} (T_1 - T_2) + \lambda] = G_{A.S.} c_u (T_1 - T_2)$$

### 2.2) ESSICCATORE MULTISTADIO (adiabatico)

Impiegato per quantità di materiale da essiccare notevoli, con esigenza in contemporanea di risparmio di energia. Gli essiccatori impiegati sono del tipo ad ARMADIO a ripiani fissi/mobili, a TUNNEL, a più TAMBURI.

Schema multistadio (3 stadi) con unico riscaldamento e con riscaldamenti intermedi tra stadi (vedi diagr Mollier):

<p><b>UNICO RISCALDAMENTO dell'ARIA</b></p>		<p>1 riscaldamento iniziale: soluzione più semplice dal punto di vista impiantistico, ma con problemi per il materiale, sottoposto nel primo piano a shock termico notevole rispetto all'ultimo, e che richiede il raggiungimento di temperature di preriscaldamento molto elevate, con spesa energetica notevole.</p>
<p><b>RISCALDAMENTO TRA STADI</b></p>		<p>riscaldam.iniziale e tra stadi: soluzione più costosa dal punto di vista impiantistico, richiede un ulteriore riscaldamento tra stadi, per ripristinare condizioni di essiccatività nell'aria, ma non risulta, come il caso precedente, shock termico, anzi le temperature raggiunte sono più basse (inferiori a T4, tipo precedente), ed è dimostrabile che la quantità totale di calore richiesta nei riscaldatori E1,E2,E3, risulta inferiore al caso precedente (solo E1).</p>

Nel caso di multistadio con riscaldamenti intermedi, per esigenze economiche, si fanno le seguenti ipotesi:

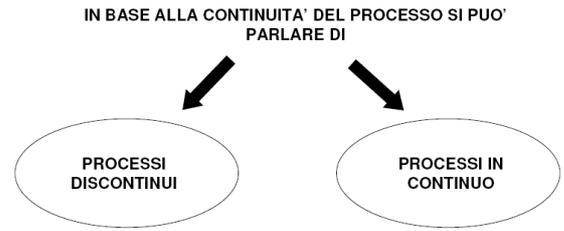
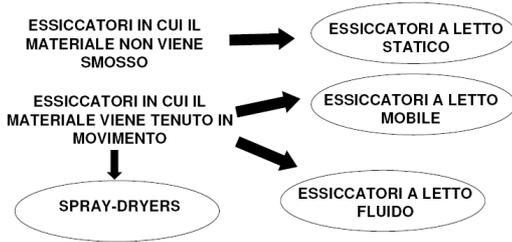
- in ogni stadio venga sottratta da parte dell'aria la stessa quantità di **umidità** del solido (intervallo U<sub>3\*</sub> - U<sub>1</sub> suddiviso in tre parti uguali, se a tre stadi);
- l'aria in **uscita** da ogni stadio abbia la stessa umidità **relativa** (i punti 1\*,2\*,3\* sono sulla stessa curva a Urel%).

### 3) APPARECCHIATURE DI ESSICCAMENTO:

Usando come criterio le modalita' di trasferimento del calore si hanno:

- ESSICCATORI A CALORE DIRETTO (CONVEZIONE)
- ESSICCATORI A CALORE INDIRETTO (CONDUZIONE)

Usando come criterio lo stato di movimento o riposo in cui viene tenuto il materiale da essiccare si possono distinguere:



#### esempi di APPARECCHIATURE DI ESSICCAMENTO:

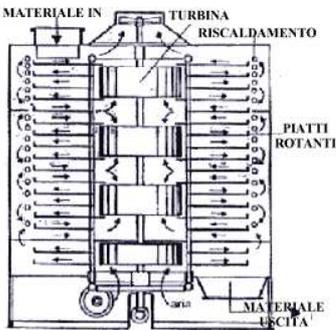
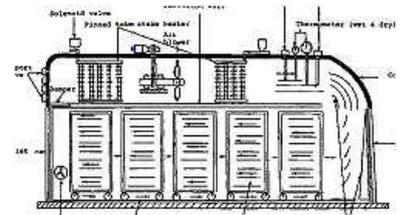
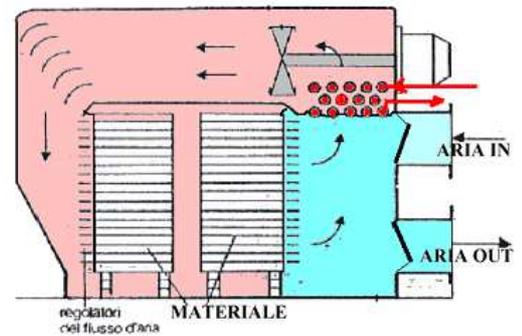
##### a) ESSICCATORE AD ARMADIO (e TUNNEL) A VENTILAZIONE FORZATA (mobile - diretto)

sono essiccatori statici ampiamente usati nell'industria farmaceutica, costituiti da grandi armadi metallici dove il materiale, su ripiani, viene essiccato da aria calda circolante; l'aria viene scaldata da resistenze elettriche o da vapore che circola in tubi.

Sono costituiti da una camera ove sono posti dei carrelli a ripiani sui quali sono posti i prodotti da essiccare (uva, vegetali, frutta ecc.). Questi essiccatori possono essere realizzati in varianti a tunnel con carrelli mobili.

Caratteristiche:

Sono ad utilizzo continuo/discontinuo; i carrelli possono muoversi nel tunnel sia in equi- che in contro corrente rispetto al flusso; l'efficienza di essiccamento, limitata, con tempi alti e temperature non uniformi, dipende dalla velocita' del flusso gassoso, dalla superficie della sostanza da essiccare, dalla differenza di temperatura tra aria e solido; possibili perdite di materiale.



##### b) ESSICCATORI A TURBINA (mobile - diretto)

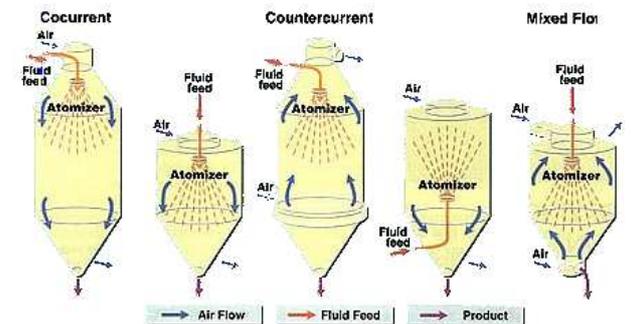
permette l'essiccazione continua in letto mobile; costituito da una serie di vassoi rotanti anulari sistemati uno sull'altro, che ruotano molto lentamente. L'aria calda circola tra i vassoi; dall'alto il materiale umido viene caricato sul primo vassoio e dopo 7-8 giri viene scaricato nel vassoio immediatamente sottostante; il processo si ripete finche' il materiale non arriva sull'ultimo vassoio e viene scaricato, completamente essiccato, all'esterno.

##### c) ESSICCATORI SPRAY (mobile - diretto)

E' il sistema più importante per l'essiccamento di liquidi (latte, estratti di caffè ed orzo, succhi, lieviti ecc.).

Il prodotto viene nebulizzato in una camera contenente aria calda. In genere le polveri ottenute sono sottoposte ad istantaneizzazione. Nel sistema **a ciclo aperto** si utilizza aria che viene riscaldata e quindi scaricata.

Il sistema **a ciclo chiuso** si utilizza invece se i solventi da evaporare sono esplosivi od i prodotti richiedono un gas inerte per l'essiccamento e quindi il fluido essiccante è riciclato.

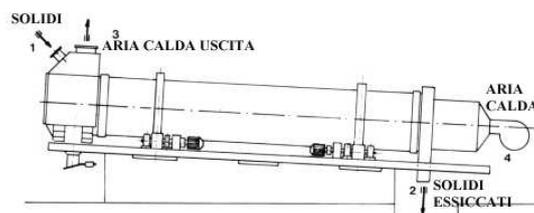


##### d) ESSICCATORI A TAMBURO ROTANTE (mobile - diretto)

E' un essiccatore a letto mobile costituito da un cilindro metallico cavo leggermente inclinato che ruota attorno al proprio asse e munito internamente di setti radiali. Il materiale da essiccare viene introdotto dall'alto e viene mantenuto in continuo movimento dal movimento del cilindro e dalla presenza dei setti.

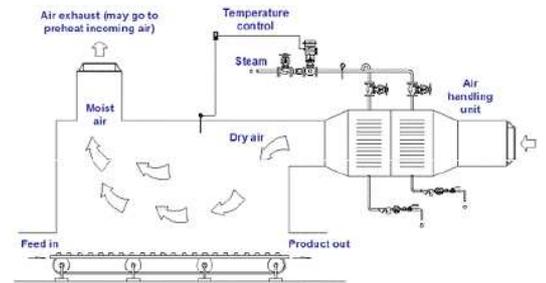
L'aria calda entra in controcorrente ed essicca il prodotto.

Questo tipo di essiccatore non può essere utilizzato per sostanze termolabili od ossidabili.



**e) ESSICCATORI A NASTRO (mobile - diretto)**

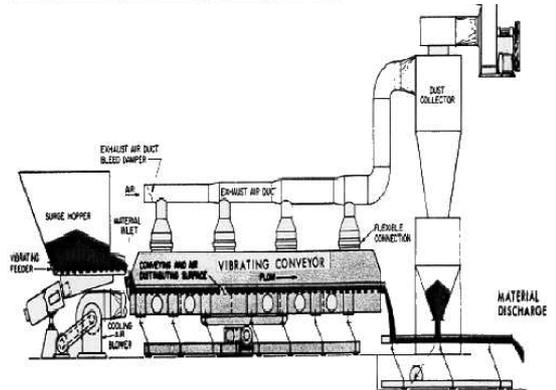
Sono essiccatori molto utilizzati per i prodotti solidi. Sono costituiti da nastri sovrapposti o da nastri in sviluppo orizzontale o da un singolo nastro che scorrono all'interno di una camera calda.



**f) ESSICCATORI A LETTO FLUIDO ORIZZONTALE (mobile - diretto)**

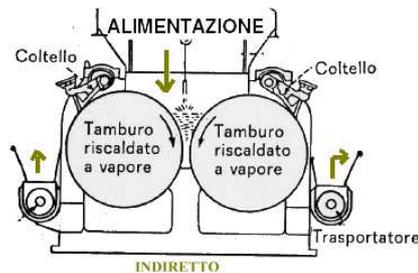
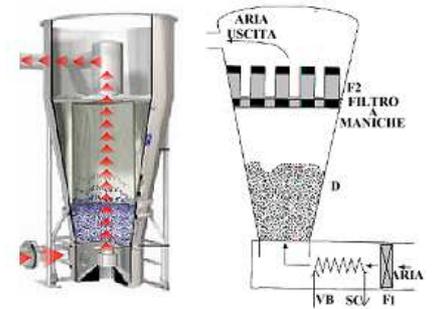
Sono essiccatori a convezione, continui o discontinui adatti per prodotti granulari e grandi quantità; e' costituito da un nastro vibrante perforato che scorre all'interno di una camera.

La corrente d'aria calda investe dal basso il prodotto da essiccare e lo tiene in sospensione. Se la velocità è troppo alta le particelle sono trascinate dal flusso, se troppo bassa ricadono. E' molto valido per prodotti termosensibili.



**g) ESSICCATORI A LETTO FLUIDO VERTICALE (mobile - diretto)**

lavorano in modo discontinuo; la capacità di queste apparecchiature varia da 5 a 200 kg, ed il tempo di essiccamento da 20 a 40 min; hanno grande efficienza e rapidità, particolarmente indicato per materiali termolabili; tutti i parametri di processo (temp. dell'aria, potenza del ventilatore) sono gestiti automaticamente.



**g) ESSICCATORI A CILINDRO ROTANTE (indiretto)**

Il prodotto viene stratificato sulla superficie di un cilindro rotante riscaldato internamente con vapore. L'acqua evapora e lascia uno strato di prodotto essiccato che viene allontanato mediante coltelli raschiatori.

**h) ESSICCATORI SOTTO VUOTO**

Si tratta di essiccatori -evaporatori che lavorano sotto vuoto così da poter utilizzare una temperatura più bassa.

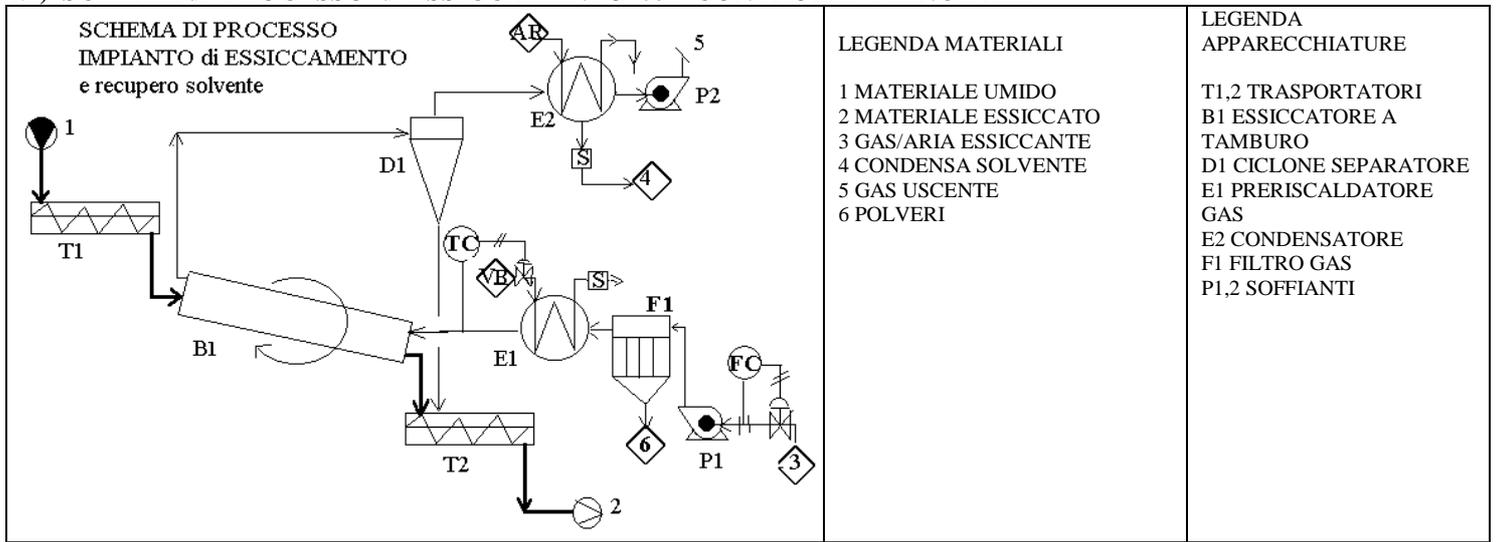
E' utilizzato nelle industrie chimiche, farmaceutiche e cosmetiche, e permette di asciugare le masse umide e le paste dense provenienti dai processi di filtrazione e centrifugazione; a tal fine un **essiccatore sotto vuoto** è sempre abbinato all'utilizzo di una **pompa da vuoto**, che consente di aspirare i vapori dei solventi e l'acqua presenti nei prodotti da trattare.

Possono essere sia continui che discontinui.

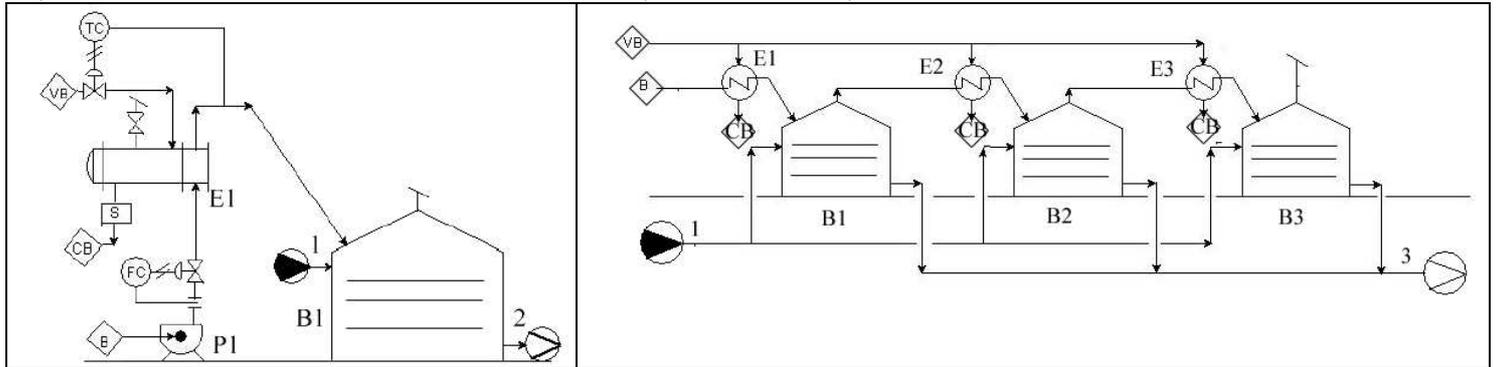
Nel caso di essiccatori continui si ha la formazione di schiuma e quindi bisogna evitare da un lato il collasso della schiuma e dall'altro l'indurimento eccessivo che bloccherebbe l'evaporazione. (cfr.ditta Italvacuum)



#### 4.1) SCHEMA di PROCESSO di ESSICCAMENTO con CONTROLLI PRINCIPALI



#### 4.2) SCHEMI di PROCESSO di ESSICCAMENTO (mono/multistadio)



Gli esercizi sull'essiccamento sono su altro documento a parte.

Segue altro DIAGRAMMA IGROMETRICO:

### Psychrometric Chart

SI (metric) units  
Barometric Pressure 101.325 kPa (Sea level)  
based on data from  
Carrier Corporation Cat. No. 794-001, dated 1975

