

ESSICCAZIONE DEI CEREALI

Si rende necessaria soprattutto per mais e riso, che vengono raccolti con umidità della granella variabile fra il 17 % e il 35 %, a seconda delle condizioni climatiche e dello stadio di maturazione del prodotto. Occorre portare tali cereali, ventilandoli con aria riscaldata (o meno), a valori di umidità pari al 13 ÷ 14 %, al fine di minimizzare le perdite quantitative e qualitative (degradazione dei composti chimici ed attacchi parassitari).

L'*umidità* del cereale è intesa come:

$$U = \frac{\text{massa dell'acqua contenuta nella cariosside}}{\text{massa dell'acqua (acqua + sostanza secca)}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Il *potere evaporante* dell'aria è funzione della sua *umidità relativa* (dipendente, a sua volta dalla temperatura). L'umidità relativa dell'aria è espressa dal rapporto (temperatura e volume identici al numeratore e al denominatore):

$$U_r = \frac{\text{massa d'acqua (sotto forma di vapore) contenuta nell'aria secca}}{\text{massa d'acqua massima (sotto forma di vapore) contenibile nell'aria secca}} \cdot 100 \quad [\%]$$

mentre l'*umidità assoluta* è data semplicemente dalla quantità d'acqua effettivamente presente nell'unità di volume dell'aria, e viene espressa in g/m^3 di aria secca.

Il grado di sfruttamento del potere evaporante è in relazione all'umidità del prodotto: è nullo quando sussiste l'*equilibrio igroscopico* tra l'aria e la granella, non avendosi passaggio dell'acqua, sotto forma di vapore, dalla granella stessa all'aria circostante.

L'essiccazione è in grado di rendere la tensione di vapore della cariosside, in corrispondenza della sua superficie esterna, maggiore della tensione del vapore contenuto nell'aria, il che comporta il passaggio dell'acqua dalla cariosside all'aria.

Appositi diagrammi sperimentali - *curve di equilibrio igroscopico* - per i diversi cereali, funzione della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria e dell'umidità della granella, consentono di valutare se per l'essiccazione è necessario o meno il riscaldamento dell'aria. Altri tipi di curve legano invece l'umidità del cereale al tempo di essiccazione in funzione della temperatura dell'aria riscaldata. Le curve di equilibrio igroscopico per il mais, ad es., fissano un *limite di instabilità* per l'aria ambiente al 65 % di U_r (al di sotto del quale non si sviluppano microrganismi e viene bloccata l'attività enzimatica). Se la temperatura dell'aria è pari a 20 °C, l'umidità di equilibrio del mais è del 13 %: in tal caso non è necessario riscaldare, ma è sufficiente ventilare. Inoltre, sempre al 65 % di umidità dell'aria, si può conservare il prodotto al 15,5 % di umidità, se l'aria ha una temperatura di circa 0° C; in altre parole, si può conservare il cereale anche ad umidità elevata, purché venga adeguatamente raffreddato.

Processo di essiccazione:

L'aria calda penetra nelle porosità della massa del cereale (dal 10 al 40 %, a seconda del tipo di cereale) asportando:

- *acqua di imbibizione*, ossia quella proveniente dall'esterno (pioggia, rugiada, nebbia) presente nei pori dei grani (oltre il 27 %, nel caso del mais);
- *acqua di vegetazione libera* (tra il 13% e il 27 %, sempre per il mais); è quella strettamente legata, senza farne parte, alle sostanze costitutive dei grani, per interazioni molecolari di carattere chimico-fisico (si trova all'interno dei macro e microcapillari).

Non viene invece interessata la terza forma d'acqua presente nel seme e cioè quella di costituzione (sotto al 13 %, per il mais), combinata con le sostanze costitutive delle cariossidi, assorbita dalla superficie esterna delle cellule e componente del plasma cellulare.

Nel processo di essiccazione si distinguono tre fasi:

- diffusione dell'acqua dall'interno della cariosside verso la superficie esterna;
- asportazione di tale acqua da parte dell'aria che circonda le cariossidi;
- allontanamento dell'aria satura.

L'evaporazione dell'acqua, procedendo dagli strati interni a quelli esterni, è sempre più difficile, sì che aumenta, man mano, il tempo di essiccazione a parità di umidità sottratta e diminuisce lo sfruttamento del potere evaporante dell'aria calda. Nel caso del riso va aggiunta la diminuzione della conduttività interna del seme col procedere dell'essiccazione, in quanto le glumelle si distaccano gradualmente dalla parte interna (chicco) durante la contrazione di quest'ultimo, conseguentemente alla sottrazione di acqua.

Per il riso si rende importante la suddivisione del processo in intervalli diversi, allo scopo di diminuire il tempo totale di essiccazione e di aumentare il *rendimento termico* dell'impianto (vedi oltre), intendendo con quest'ultimo il rapporto:

$$U_r = \frac{\text{quantità di calore necessaria a far evaporare un kg d'acqua allo stato libero (c. a. 2500 kJ)}}{\text{quantità di calore spesa nell'essiccazione per far evaporare un kg d'acqua dalla granella}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Si applica, allo scopo, il *rinvenimento* in sili (vedi oltre), dopo una prima esposizione ad aria calda, che consente una diffusione dell'acqua libera verso gli strati più esterni delle cariossidi ed il passaggio dell'acqua dalle cariossidi più umide a quelle più secche, rendendo in tal modo più uniforme la massa da essiccare. Nei sili di rinvenimento il prodotto può sostare dalle 5 alle 10 h. Tale tecnica comporta una riduzione del tempo totale di essiccazione del 10 ÷ 20 % ed un aumento del rendimento termico del 5 ÷ 10 %.

IMPIANTI DI ESSICCAZIONE

1) Gruppo aereotermico per la produzione di aria calda.

E' costituito da

1.1) bruciatore;

1.2) forno;

1.3) ventilatore.

Il bruciatore può essere:

- a gasolio, con polverizzazione del combustibile di tipo meccanica (fuoriuscita da un opportuno ugello alla pressione di 8 ÷ 12 bar);
- ad olio combustibile, con sistema di preriscaldamento del combustibile a circa 120° C, al fine di renderlo meno denso (pressione di 20 bar).

Il bruciatore è spesso del tipo a due stadi: un termostato attiva la seconda fiamma se l'altra, da sola, non è sufficiente a mantenere la temperatura dell'aria al valore richiesto.

Il forno è realizzato con materiali (refrattari, acciai inossidabili, se i combustibili contengono zolfo) in grado di sopportare temperature dell'ordine dei 1000 °C ed è dimensionato sulla base di 1 m³ su 837000 kJ/h (=200000 kcal/h) di potenza termica.

Il riscaldamento del fluido essiccante può avvenire *direttamente o indirettamente*.

Nel primo caso i prodotti della combustione entrano a far parte del fluido, miscelandosi con l'aria (tecnica non usata per l'essiccazione di prodotti per alimentazione umana) e vengono a contatto diretto con il prodotto. Nel secondo caso l'aria è riscaldata a mezzo di scambiatori di calore a fasci tubieri e i prodotti della combustione vengono evacuati senza che essi si mescolino con l'aria essiccante. La superficie di scambio viene dimensionata sulla base di 1 m² per 42000 kJ/h ((10000 kcal/h). Nel riscaldamento indiretto si utilizza solitamente olio combustibile. Il riscaldamento diretto comporta costi più ridotti di installazione e maggior rendimento termico rispetto allo scambiatore (0,95 (0,98 contro 0,85 (0,90).Altri combustibili impiegati sono il gas liquido (butano) e gassoso (butano, propano o gas naturale) che consentono il riscaldamento diretto non originando incombusti solidi. I combustibili alternativi (sottoprodotti di lavorazioni) sono peraltro da tempo già utilizzati vantaggiosamente in sostituzione di quelli tradizionali.

I ventilatori sono per lo più del tipo centrifugo e funzionano in pressione, localizzati a valle del forno. Recentemente sono stati impiegati anche ventilatori funzionanti in depressione (negli essiccatoi a colonna ermeticamente chiusi, con ventilatori centrifughi o assiali), installati in corrispondenza dell'uscita dell'aria umida. Questi ultimi permettono di eliminare il ventilatore di raffreddamento, garantendo inoltre una migliore depolverizzazione dell'ambiente.

2) Corpo essiccante o contenitore

Classificazione degli impianti

a) in funzione della modalità di carico del corpo essiccante:

- *continui*: il contenitore è alimentato con continuità o con periodicità a brevi intervalli di tempo;
- *discontinui*: il contenitore viene completamente svuotato al termine dell'essiccazione e nuovamente riempito di prodotto da essiccare;

b) in funzione della modalità di avanzamento del prodotto all'interno del corpo essiccante:

- *a grana continua*: se la granello procede con continuità nel contenitore;
- *a grana discontinua*: se si verificano interruzioni del flusso di prodotto;

c) in funzione del principio di svuotamento del corpo:

- *a gravità*: quando il cereale scende spontaneamente lungo le diverse sezioni del contenitore;

- *meccanici*: quando il prodotto viene fatto avanzare con dispositivi meccanici;
- *misti*: se sono sfruttati entrambi i principi;

d) in relazione al processo di essiccazione:

- con rinvenimento del prodotto (riso);
- senza rinvenimento;

e) in base al tipo di installazione:

- fissi;
- mobili.

TIPI DI ESSICCATOI

Essiccatoio a colonna

(altezze fino a 20 m; portata specifica dell'aria: $5000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^3$ di granella)

a) *a colonna semplice* e a sviluppo verticale, di forma parallelepipedica, costituito da tre sezioni una centrale per l'aria calda insufflata dalla base, e due laterali, a pareti piane forate, verticali e parallele, contenenti il prodotto in strati di circa 60 cm. Quest'ultimo scende dall'alto della tramoggia di carico per gravità, investito dall'aria calda in controcorrente, raggiunge la base dell'essiccatoio ed è convogliato di nuovo, tramite coclea ad un elevatore che lo invia nuovamente alla sommità della struttura per riprendere il ciclo (sistema a ricircolo).

Caratteristiche: generalmente più colonne (fino a 4) in parallelo; indicato per il riso in impianti di piccole/medie potenzialità ($10 \div 12 \text{ t}$ di cereale umido/24 h . colonna) (essiccatoio discontinuo, a grana continua, a gravità).

b) *a zig-zag*: solitamente le pareti delle celle della colonna sono di tipo "a persiana", anziché piane, in modo tale da far assumere al prodotto che scende un movimento a zig-zag, il quale provoca un continuo rimescolamento del cereale dando luogo ad una maggiore uniformità di evaporazione. Il numero di celle è generalmente pari a 4 (ma può arrivare a 6). L'essiccazione si completa in una sola discesa.

L'impianto è dotato di uno o più ventilatori di raffreddamento della granella localizzati alla base. E' inoltre previsto un filtro per l'aria umida allo scopo di trattenere le polveri prelevate durante la fase di attraversamento negli strati del cereale (essiccatoio continuo, a grana continua, a gravità).

Il raffreddamento finale è necessario affinché la granella non subisca una rapida e significativa perdita di peso dovuta all'anidride carbonica che si libererebbe a temperatura più alta oltretutto per evitare la condensazione dell'acqua che si avrebbe nei punti più freddi dei sili di stoccaggio, con innesco di fenomeni fermentativi.

Negli impianti più evoluti, tesi al raggiungimento di elevati rendimenti termici sfruttando al meglio il potere evaporante dell'aria calda e recuperando il calore assorbito dall'aria di raffreddamento, la colonna viene suddivisa in diverse zone a temperatura decrescente ("alta", a $150 \div 160^\circ \text{C}$; "media", a $100 \div 110^\circ \text{C}$; "bassa", a $60 \div 70^\circ \text{C}$) compresa quella inferiore di raffreddamento del cereale con aria ambiente.

L'essiccatoio a temperature differenziate sfrutta il massimo potere evaporante dell'aria calda (alla temperatura più alta) in quanto essa investe il cereale al massimo grado di umidità e con distribu-

zione dell'acqua sufficientemente uniforme all'interno delle cariossidi (se le cariossidi fossero già in parte essiccate, l'aria molto calda, a causa di tensioni, potrebbe provocare rotture superficiali dei grani).

L'aria molto calda viene evacuata dalla parte alta della colonna, essendo satura di acqua, mentre l'aria delle zone a temperatura più bassa viene recuperata e miscelata con l'aria in ingresso nel forno.

Negli impianti a zig-zag di tipo industriale possono essere previste più colonne in parallelo (fino a 6 o 8 colonne). La potenzialità, funzione delle dimensioni della colonna è in tal caso variabile tra le 100 e le 400 ÷ 500 t di prodotto al 28 ÷ 30 % di umidità iniziale nelle 24 h.

c) nella versione *a losanga* (o a nido d'ape) si verifica pure un movimento a zig-zag del prodotto dovuto alla presenza di una doppia serie sfalsata di canalizzazioni orizzontali dalle quali esce l'aria calda (canale basso) entrando nell'ammasso della granella e nei quali entra l'aria umida (canale alto) che viene evacuata.

Sono tra gli essiccatoi più diffusi per le medie ed alte potenzialità. Anche per questo tipo di essiccatoio sono previsti sistemi di recupero del calore (celle di preessiccazione) e soluzioni per rendere graduale l'essiccazione (riducendo, in quest'ultimo caso, la portata d'aria calda con opportune serrande (essiccatoio continuo, a grana continua, a gravità).

d) l'essiccatoio *cilindrico* è realizzato con pareti in lamiera forata. Il prodotto scende per gravità all'interno dell'intercapedine anulare formata da due cilindri concentrici (circa 50 cm tra le due pareti). Al centro del contenitore interno è situata una coclea che solleva il prodotto dal basso verso l'alto ponendolo in ricircolo. Lo stesso cilindro interno riceve l'aria calda proveniente dal forno e la insuffla nella massa di cereale. L'essiccatoio è di tipo discontinuo, a grana continua e a gravità. Presenta generalmente una bassa potenzialità ed è in più casi provvisto di ruote.

Il raffreddamento avviene azionando lo stesso ventilatore dell'aria calda spegnendo preventivamente il bruciatore.

Allo scopo di moltiplicare la potenzialità dell'attrezzatura, anziché aumentare la dimensione dell'essiccatoio, si procede talvolta a porre più contenitori in parallelo.

Essiccatoio a piani orizzontali ribaltabili

(continuo, a grana discontinua, misto, con o senza rinvenimento)

E' composto di una serie di telai orizzontali in rete metallica, sovrapposti e ribaltabili mediante un dispositivo automatico. Il cereale è disposto su di essi in strati di 13 ÷ 14 cm; l'aria calda entra da condotti situati fra due telai, da un lato dell'essiccatoio, ed esce da condotti sfalsati, rispetto ai primi, dal lato opposto. L'impianto è solitamente a due colonne di piani in serie, sicché il cereale parzialmente deumidificato, uscente dalla prima colonna, può essere inviato a sili di rinvenimento per essere successivamente introdotto nella seconda colonna per completare l'essiccazione.

E' indicato per l'essiccazione di riso. Presenta capacità di lavoro di 70 ÷ 90 t (di cereale umido)/24 h con spese di energia di 4500 kJ (1075 kcal) per kg di acqua, corrispondente ad un rendimento termico del 55 %.

Essiccatoio a tappeto

(continuo, a grana continua, con movimento meccanico, senza rinvenimento)

E' costituito da un piano superiore (griglia) sul quale il prodotto, in strato di circa 15 cm, avanza grazie ad un sistema a catena con spranghe trasversali a funzionamento intermittente, sincronizzato con il gruppo alimentatore (tramoggia). Su tale piano il prodotto subisce una preessiccazione opera-

ta dall'aria calda che attraversa il piano inferiore, ricoperto da uno strato di 30 ÷ 35 cm di granella. Il ventilatore immette aria calda al di sotto del piano inferiore; su quest'ultimo il prodotto, che cade dal tappeto superiore, viene essiccato e fatto avanzare tramite agitatori a palette, pure sincronizzati con l'alimentazione, per essere infine raffreddato ed evacuato.

Presenta potenzialità comprese fra le 50 e le 300 t (di cereale umido)/24 h.

Essiccatoio statico

(portate specifiche del ventilatore: 400 ÷ 450 m³/h . m³ di granella)

a) tipo *semplice cilindrico* (discontinuo, a grana discontinua)

E' costituito da un cilindro metallico, di diametro pari a 5 ÷ 8 m, aperto superiormente e con un piano grigliato sul quale viene steso uno strato di circa 1 m di prodotto. Un sistema a doppia coclea permette lo svuotamento dell'essiccatoio.

La capacità produttiva è modesta (20 ÷ 70 t di mais/24 h), si presta per piccole aziende

b) tipo *a platea* (discontinuo, a grana discontinua)

Si tratta di un corpo essiccante a platea grigliata, inclinata, sulla quale il prodotto viene distribuito dal lato più alto, tramite una coclea di carico fino al raggiungimento di uno strato di 0,5 ÷ 0,6 m.

c) tipo *cilindrico ad asse orizzontale* (anche a più cilindri) (discontinuo, a grana discontinua, a gravità)

E' costituito da una doppia parete esterna in rete metallica per il contenimento del cereale (spessore di 30 cm) e di un canale centrale per l'insufflazione dell'aria calda. Viene riempito dall'alto e il prodotto rimane statico nel cilindro, per essere poi raffreddato in una cella apposita e inviato ad una tramoggia di scarico. L'ingresso dell'aria calda è intervallato, in modo automatico, ad immissioni di aria ambiente, ad intervalli molto brevi (4 ÷ 8 s con aria calda, 7 ÷ 11 s con aria ambiente), sicché l'impianto è detto anche "ad impulsi".

Impianti con potenzialità fino a 700 t/giorno prevedono fino a quattro contenitori uno sull'altro: in questo caso l'essiccazione ha luogo ad intervalli nei vari contenitori, di cui l'ultimo serve per il raffreddamento. Un siffatto impianto può dunque considerarsi di tipo continuo.

3) Attrezzature complementari

a) *Tramoggia di ricezione* (per essiccatoi di una certa potenzialità)

E' interrata, realizzata con pareti in calcestruzzo armato lisce inclinate verso il centro nella parte più bassa, in modo tale da assicurare il riempimento del trasportatore longitudinale che provvede all'invio del materiale all'elevatore (a tazze) per il riempimento di silo del prodotto verde o, direttamente, del corpo dell'essiccatore. A livello del terreno, ossia nella parte superiore, la tramoggia è chiusa con una robusta griglia in acciaio (larga 3 ÷ 4 m) per consentire il passaggio dei mezzi di trasporto e lo scarico del prodotto sulla sua intera lunghezza (5 ÷ 20 m). La capacità della tramoggia (30 ÷ 80 t) è in relazione all'esistenza di sili di accumulo del prodotto verde, generalmente prevista per potenzialità medio-alte degli impianti.

b) *Pulitori del prodotto*

Possono essere di diversa tipologia (rotativi, alternativi, a ciclone). Servono per l'eliminazione delle impurità verdi e secche, per cui possono essere presenti due o più unità indipendenti, installate nei vari punti della linea di essiccazione.

c) *Sili di deposito del verde (e di rinvenimento)*

Hanno funzione di "polmone" in relazione al ritmo di lavoro delle mietitrebbiatrici e dell'impianto. La capacità può andare dalla metà all'intera potenzialità giornaliera dell'impianto.

d) *Sili di stoccaggio*

Sono impiegati per l'accumulo del prodotto da inviare ai molini. Hanno forma cilindrica con pareti ondulate in lamiera zincata, realizzate utilizzando elementi, detti "virole", imbullonate a montanti verticali disposti radialmente alla periferia del silo alla distanza di circa 1 m. Anche se le virole sono montate utilizzando apposite guarnizioni, non essendo imbullonate sui quattro lati, il silo in lamiera descritto non è "a tenuta", per cui si presta esclusivamente per prodotti essiccati o parzialmente essiccati, in cui gli scambi gassosi con l'esterno non siano altamente pregiudizievoli (come avviene per i foraggi) nei confronti della qualità del prodotto conservato (nel lungo periodo).

Questa tipologia di silo spesso prevede un sistema di ventilazione del cereale costituito da un grigliato, alla base, di tipo a platea o a canali, e da un ventilatore assiale o centrifugo. Il sistema permette di praticare:

- una "ventilazione di mantenimento", da effettuarsi con aria ambiente, che impedisce innalzamenti troppo elevati della temperatura (portate d'aria di $20 \div 50 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^3$ di cereale), oppure;
- una "ventilazione essiccate", da effettuarsi con aria ambiente o leggermente preriscaldata (da qualche grado centigrado a temperature di $40 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Tale ventilazione costituisce il secondo stadio del processo di essiccazione secondo la tecnica della "dryaeration", che prevede il completamento dell'essiccazione del cereale - portato, con l'essiccazione tradizionale, ad un'umidità del $18 \div 19 \%$ - fino al $13 \div 14 \%$, nel silo in cui il cereale verrà conservato.

I sili in lamiera d'acciaio ondulata, che sono fra quelli più utilizzati per i cereali, possono essere realizzati con altezze fino a 14 m (tetto escluso) con diametri fino a 15 m, per capacità fino a 2000 t di prodotto (nel caso di cereale con massa volumica di circa 780 kg/m^3) (ma esistono sili anche di capacità pari a 3000 t).

Classificazione dei sili in base all'ubicazione

1) *sili aziendali*

Hanno capacità corrispondenti al prodotto esauribile nel periodo che va da un raccolto all'altro. Tali sili sono necessariamente affiancati ad un impianto di essiccazione.

2) *sili di cooperative*

Raccogliono il prodotto proveniente da più aziende. Presentano capacità anche superiori alle 1000 t. Vengono realizzati in calcestruzzo armato in acciaio e possono essere ermetici o meno. Nel secondo caso sono previsti sistemi di ventilazione della granella. I primi consentono la conservazione in atmosfera controllata. Il tempo di stoccaggio può essere molto elevato (superiore ad un anno).

3) I *sili portuali* hanno capacità superiori alle 5000 t, spesso di 10000 ÷ 20000 t, ma anche di oltre 50000 t. Sono costruiti solitamente in calcestruzzo armato ma anche in acciaio protetto dalla corrosione causata dall'atmosfera marina. Questi sili, non dotati di essiccatoi, ma di sistemi di areazione della massa, consentono una conservazione per tempi molto brevi (giorni, settimane). Se la conservazione deve protrarsi più a lungo si può ricorrere all'atmosfera controllata. Allo scopo si utilizza l'azoto, la cui applicazione richiede ambienti altamente ermetici (ossigeno residuo < 0,5 %). Con azoto puro ed un'umidità del 15 % si ottiene una protezione completa contro i miceti e gli insetti, senza impiegare prodotti chimici. Il calo di peso del cereale risulta ridotto mentre la capacità germinativa del seme viene conservata a lungo. La scelta del tipo di atmosfera dipende dall'ermeticità della struttura e dal tipo di controllo che si vuole operare (ad es. se il silo non è ermetico si preferisce aumentare la CO₂).

e) *Altre attrezzature*

- per la movimentazione del prodotto (trasportatori a coclea, a catena ecc.);
- per la pesatura automatica del prodotto;
- per il controllo della temperatura, dell'umidità dell'aria all'entrata e all'uscita dell'essiccatoio;
- sistemi di depolverizzazione dell'aria umida (soprattutto negli impianti a colonna). Possono essere "a secco", con filtri telati, o, "a umido", mediante il passaggio dell'aria attraverso un film d'acqua realizzato con un sistema gocciolatore (più spinto che nel primo caso, potendo eliminare 3 ÷ 5 mg di polvere per m³ di aria).

PARAMETRI FUNZIONALI DELL'ESSICCAZIONE

1) *Quantità d'acqua da evaporare*

La quantità d'acqua (kg) da asportare al prodotto umido (t) per portarlo da un'umidità iniziale U_i (%) ad un'umidità finale U_f (%) è calcolata con la formula:

$$Q_{pu} = \frac{U_i - U_f}{100 - U_f} \cdot 1000 \quad [\text{kg/t}]$$

per cui, ad es., se il prodotto umido, di umidità U_i = 28 %, ha una massa di 5 t e deve essere portato ad U_f = 14 %, occorrerà sottrarre una quantità d'acqua pari a:

$$Q_{pu} = \frac{28 - 14}{100 - 14} \cdot 1000 \cdot 5 = 162,8 \cdot 5 = 814 \quad \text{kg}$$

2) *Quantità d'acqua evaporata* (dal prodotto secco)

E' la quantità d'acqua evaporata rapportata al prodotto essiccato di umidità finale U_f. Essa è data dalla formula:

$$Q_{pe} = \frac{U_i - U_f}{100 - U_i} \cdot 1000 \quad [\text{kg/t}]$$

utilizzando i dati numerici dell'esempio di cui sopra:

$$Q_{pe} = \frac{28 - 14}{100 - 28} \cdot 1000 \cdot 5 = 194,4 \cdot 5 = 972 \text{ kg}$$

3) Corrispondenza fra quantità di prodotto umido (P_u) ed essiccato (P_e)

$$P_u = \frac{100 - U_f}{100 - U_i} \cdot P_e \quad [\text{t}]$$

$$P_e = \frac{100 - U_i}{100 - U_f} \cdot P_u \quad [\text{t}]$$

4) Umidità espressa in "punti percentuale"

1 punto = 1,1628 kg di acqua (riferito a 100 kg granella). Per passare dal 35 al 14 % di umidità, 100 kg di granella devono perdere 24,419 kg, per cui $24,419/21 = 1,1628$ kg.

PARAMETRI FUNZIONALI DELL'ESSICCATOIO

1) Capacità di evaporazione dell'impianto

E' uno degli indici di efficienza di un impianto. Si esprime in chilogrammi d'acqua evaporata in un'ora ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$) o in punti percentuali di umidità eliminati (punti/h).

E' funzione di:

- umidità relativa dell'aria all'ingresso della massa di cereale;
- umidità relativa dell'aria all'uscita della massa di cereale;
- temperatura dell'aria (all'aumentare della temperatura diminuisce l'umidità relativa).

La sua determinazione avviene graficamente a partire dal diagramma di Mollier che consente di determinare la quantità d'acqua (q), in grammi, asportata dal chilogrammo di aria secca, sulla base dell'umidità assoluta dell'aria, prima (X_1) e dopo (X_2) il suo passaggio attraverso la massa del cereale:

$$q = (x_2 - x_1) \quad [\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg aria secca}]$$

Il valore di q (detta anche *capacità specifica di evaporazione*) dipende dal grado di sfruttamento del potere assorbente del flusso termico, a sua volta dipendente dal sistema di rimescolamento del pro-

dotto e del tipo di percorso dell'aria all'interno della massa (a parità di condizioni fisiche dell'aria ambiente, dell'aria calda e della portata del ventilatore).

La capacità di evaporazione dell'impianto sarà pertanto data dall'espressione:

$$Q_a = \frac{q \cdot V \cdot \rho_a}{1000} \quad [\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}]$$

dove:

V = portata d'aria effettiva del ventilatore (m^3/h);

V viene definita sulla base delle dimensioni della colonna dell'essiccatoio, ovvero della capacità di contenimento della granella, ai fini del massimo sfruttamento del potere evaporante dell'aria. Numericamente la *portata specifica dell'aria*, V_s (cioè riferita alla tonnellata di granella secca contenibile nella colonna), si attesta sui $2000 \div 2800 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{t}$ di granella. Può anche essere raddoppiata per rendere più rapida l'essiccazione, a scapito, tuttavia del rendimento termico dell'impianto.

ρ_a = massa volumica dell'aria secca a temperatura ed umidità ambiente (kg/m^3).

Q_a varia in funzione al tipo di cereale essiccato: è più bassa per il riso rispetto al mais, in conseguenza delle maggiori difficoltà del primo ad eliminare la propria acqua in eccesso. Q_a può andare da qualche centinaio a qualche migliaio di kg di acqua evaporati in un'ora.

2) *Quantità oraria di granella essiccata (potenzialità oraria dell'essiccatoio)*

Sulla base di Q_a e di Q_{pu} è possibile così calcolare la quantità oraria di granella essiccata riferita al prodotto umido (P_{uh}):

$$P_{uh} = \frac{Q_a}{Q_{pu}} \quad [\text{t}/\text{h}]$$

od al prodotto essiccato:

$$P_{eh} = \frac{Q_a}{Q_{pe}} \quad [\text{t}/\text{h}]$$

Esempio di calcolo della potenzialità oraria dell'essiccatoio

Dati:

- Tipo di cereale = mais
- P_u = quantità di cereale umido da essiccare = 28,3 t
- U_i = umidità iniziale del cereale da essiccare = 35 %
- U_f = umidità finale del cereale essiccato = 14 %

- P_e = quantità di prodotto essiccato (massa del prodotto secco nella colonna) = 21,4 t
- q = capacità specifica di evaporazione = 23 g_{H₂O}/kg di aria secca (esempio per un essiccatoio continuo impiegato per il mais, con temperatura dell'aria calda sui 100 °C) (q si ricava con il diagramma di Mollier, conoscendo l'umidità relativa e la temperatura dell'aria in ingresso e in uscita dalla massa)
- $V = 50000$ m³/h di aria ambiente con $\rho_a = 1,235$ kg/m³ (a 10°C ed all'80 % di umidità relativa) ($V = V_s \cdot P_e$, dove $V_s = 2336$ m³/h · t di granella secca)

La capacità di evaporazione dell'impianto risulta pari a:

$$Q_a = \frac{23 \times 50000 \times 1,235}{1000} = 1420 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{h}$$

La quantità d'acqua da asportare per tonnellata di cereale sarà data da:

$$Q_{pu} = \frac{35 - 14}{100 - 14} \cdot 1000 = 244,2 \text{ kg} / \text{t}$$

La potenzialità dell'impianto (granella essiccata per ora) è dunque pari :

$$P_{uh} = \frac{1420}{244,2} = 5,82 \text{ t} / \text{h}$$

per una potenzialità giornaliera (nelle 24 h) pari a 139,7 t di mais umido.

3) *Tempo di essiccazione*

Dipende da:

- capacità di evaporazione dell'impianto, tipo di prodotto, sua umidità iniziale;
- condizioni dell'aria ambiente.

Valori numerici orientativi:

- per gli essiccatoi statici: da un minimo di 5 ÷ 6 h ad un massimo di 16 ÷ 18 h (in quest'ultimo caso con celle di 7 ÷ 8 m di diametro);
- negli essiccatoi a colonna cilindrica a ricircolo: 3 ÷ 5 h;
- negli essiccatoi continui: fino a 2 ÷ 4 h (come minimo).

4) *Potenzialità giornaliera dell'impianto*

Dipende dalle caratteristiche costruttive dell'impianto, dal tempo di essiccazione, quindi, dall'umidità del prodotto da essiccare (in genere, per quanto riguarda il mais, ci riferisce ad un'umidità del 28 ÷ 30 %) e dalle condizioni ambientali. E' un elemento riportato nelle caratteristiche funzionali degli essiccatoi. Può variare da qualche decina a qualche centinaio di tonnellate al giorno; in alcuni casi anche migliaia di tonnellate, se si utilizzano più contenitori in parallelo.

5) *Temperature dell'aria calda*

Il livello massimo di temperatura è funzione, oltre che della tipologia dell'impianto, di due fattori fondamentali:

- umidità iniziale del prodotto;
- destinazione del prodotto.

La temperatura sopportabile diminuisce con l'aumentare dell'umidità. In particolare per il riso un riscaldamento iniziale a temperatura elevata, da cui una rapida evaporazione dell'acqua superficiale, può essere causa di lesioni delle cariossidi che si ripercuotono negativamente all'atto della lavorazione industriale.

Nel caso del mais ad uso alimentare, la temperatura dell'aria, all'inizio dell'essiccazione (prodotto al 28 ÷ 30 % di umidità) non deve superare i 55 ÷ 60 °C, per poi salire gradualmente a 80 ÷ 100 °C e fino a 130 ÷ 140 °C, nel caso di essiccatoi a tappeto.

Se il mais è da seme la temperatura può salire a 30 °C se il prodotto è abbastanza umido, per giungere fino a 50 °C in prossimità dell'umidità di conservazione (oltre può sopraggiungere la morte delle cariossidi).

Per il riso, sia per alimentazione che da semente, la temperatura massima si aggira attorno ai 38 ÷ 40 °C; in queste condizioni vengono preservate sia le caratteristiche organolettiche che la germinabilità del seme.

6) *Consumo orario e specifico di combustibile*

Sono entrambi notevolmente influenzati dalle condizioni dell'aria comburente (il consumo aumenta al diminuire della temperatura ambiente e all'aumentare dell'umidità relativa).

Consumo orario di combustibile: è riferito alla potenzialità dell'impianto.

Consumo specifico di combustibile (per tonnellata di granella secca): dipende grandemente dall'umidità iniziale del prodotto.

Valori numerici orientativi

Consumo orario di combustibile (gasolio): varia da un minimo di 10 ÷ 15 kg/h (essiccatoi statici) a un massimo di 300 ÷ 350 kg/h (contenitori a colonna a recupero di calore).

Come caratteristica dell'impianto viene più frequentemente indicata la "potenza termica" installata in relazione ai kJ/h (kcal/h) sviluppabili dal bruciatore. La "potenza termica" si ottiene come prodotto fra il consumo orario ed il potere calorifico inferiore del gasolio (43000 kJ/kg \approx 10250 kcal/kg) risultando, dunque, pari, nel caso dei tipi statici, a 430000 ÷ 645000 kJ/h (\approx 102500 ÷ 154000 kcal/h).

Potere calorifico inferiore di altri combustibili.

Olio combustibile: 40000 kJ/kg; propano e butano: 46000 kJ/kg; metano: 36500 kJ/m³.

Consumo specifico di combustibile: varia tra 11 e 18 kg di gasolio per tonnellata di granella di mais secco (fino a 25 kg/t per alcuni impianti mobili). Per il riso, nel caso di impianti fissi, si va da 14 a 25 kg/t.

7) *Consumo specifico di energia elettrica*

E' riferito all'azionamento del bruciatore, del gruppo soffiante, del sistema di movimentazione del prodotto e dell'apparato di pulitura. Per i cereali si assume un valore compreso fra 8 e 9 (grandi impianti per il mais) e 25 kWh per tonnellata di prodotto secco.

8) *Consumo termico specifico e rendimento termico totale*

Dipendono dalle condizioni dell'aria ambientale, dall'umidità dell'aria all'uscita dell'essiccatoio e da quella del prodotto verde. Il consumo termico diminuisce all'aumentare della temperatura dell'aria ambiente, al diminuire dell'umidità relativa dell'aria, all'aumentare del tenore di umidità del prodotto "verde" (in quanto l'acqua è più difficilmente estraibile se l'umidità è bassa).

Il *consumo termico specifico* è rappresentato dal calore speso per evaporare un chilogrammo di acqua ed è fornito dall'espressione:

$$W_s = \frac{W_h}{Q_a} \quad [\text{kJ/kgH}_2\text{O}] \text{ oppure } [\text{kcal/kgH}_2\text{O}]$$

dove: $W_h = C_h \cdot H_i$ [kJ/h] oppure [kcal/h]. W_h rappresenta la quantità oraria di calore prodotto dalla combustione di C_h chilogrammi per ora di combustibile avente potere calorifico inferiore H_i .

In base a W_s si ricava il *rendimento termico totale*:

$$\eta = \frac{W_e}{W_s}$$

dove W_e è la quantità di calore necessaria per evaporare un chilogrammo d'acqua allo stato libero, mentre W_s è quella realmente spesa nell'essiccatoio per estrarla dalle cariossidi.

W_e è calcolabile dalla formula di Mollier: $W_e = 595 + 0,46 (t_2 - t_0)$ [kcal/kgH₂O], dove 595 è il calore di vaporizzazione dell'acqua, mentre il secondo termine è il calore di riscaldamento della stessa dalla temperatura ambiente t_0 alla temperatura t_2 dell'aria umida all'uscita della colonna. Numericamente $W_e = 2512 \div 2533$ kJ/kgH₂O.

Il rendimento termico η diminuisce al diminuire dell'umidità del prodotto da essiccare.

Nel caso del riso si hanno, orientativamente, valori di η pari a 0,45 ÷ 0,55, mentre per il mais si arriva a rendimenti di 0,60 ÷ 0,65. Detto ciò, per il riso, ad es. i consumi termici specifici possono risultare pari a: $W_s = 2512/0,45 = 5582$ kJ/kgH₂O (= 1333 kcal/kgH₂O).

Tecniche di essiccazione

a) *Sistema tradizionale*

Si realizza in un solo passaggio del cereale all'interno del contenitore con raffreddamento finale (od in più passaggi nel caso di funzionamento a ricircolo). Comporta elevati tempi di essiccazione che possono rallentare la fase di raccolta.

b) *Sistema "a due passaggi" con stoccaggio intermedio*

Dà luogo ad un considerevole aumento della produttività giornaliera dell'impianto (fino al 60 ÷ 70 %). Nel primo passaggio l'umidità del cereale viene abbassata a valori del 20 %, mentre col secondo

passaggio viene portata a valori di conservazione. La fase intermedia di stoccaggio avviene in celle di ventilazione (lenta, con aria ambiente). Per contro questa tecnica comporta maggiori perdite di sostanza secca rispetto a quella tradizionale ed una maggiore complessità impiantistica.

c) *Sistema a ventilazione permanente*

Consiste in una ventilazione con aria ambiente, senza riscaldamento, in appositi contenitori di stoccaggio, con portate di circa 50 m³/h per m³ di granella.

Questa tecnica si applica dove le condizioni termoigrometriche lo consentono e quando l'umidità di raccolta del cereale non supera il 20 % (USA). Richiede lunghi tempi di essiccazione e difformità di umidità fra strati bassi ed alti del silo.

d) *Sistema con due essiccatoi in serie e rinvenimento*

Il cereale sosta in una tramoggia od in un silo per un periodo, nel caso del mais, pari a circa 4 ÷ 5 h, tale da consentire la diffusione e l'omogeneizzazione dell'umidità all'interno della cariosside ed in seno alla massa di cereale.

Nel caso del mais si interrompe il processo di essiccazione nel primo contenitore quando il prodotto ha raggiunto circa il 23 ÷ 25 % di umidità (partendo anche dal 40 %, come avviene in Francia). I vantaggi consistono in un incremento della produttività dell'impianto quantificabile nella misura del 20 ÷ 30 %, nel caso del mais (15 % per il riso), con possibilità di operare a temperature più elevate.

e) *Sistema dryeration (o superdry)*

Si attua un raffreddamento lento all'esterno dell'essiccatoio, in una cella di riposo e ventilazione. Il ciclo si compie in quattro fasi:

- 1) essiccazione rapida con temperature elevate (110 ÷ 120 °C), fino ad umidità del 18 ÷ 19 %, eliminando la zona di raffreddamento del contenitore;
- 2) riempimento del prodotto caldo (50 ÷ 60 °C) nella cella di dryeration, dove riposa per circa 12 h (8 h per il riempimento, 4 per il riposo vero e proprio), tale da consentire il rinvenimento della cariosside e l'omogeneizzazione del prodotto (vengono così limitate le tensioni interne, responsabili di rotture, che si generano nel rapido raffreddamento della tecnica di essiccazione tradizionale);
- 3) lento raffreddamento (almeno 12 h) con portate di 40 ÷ 60 m³/h per m³ di granella di aria ambiente. La massa viene raffreddata a 15 ÷ 20 °C, asportando, per effetto del calore accumulato nella precedente fase di essiccazione, i punti residui di umidità portandola a valori di conservazione;
- 4) scarico del mais dalla cella di riposo e ventilazione (dura quasi quanto il carico).

Complessivamente il ciclo dura circa 32 h, per cui occorre prevedere, per un funzionamento di 8 h dell'essiccatoio, almeno 4 celle di raffreddamento.

Per ovviare a tale necessità è prevista una *dryeration continua*, ottenuta con una cella collegata in serie all'essiccatoio, divisa in almeno quattro settori, nella quale l'estrazione del mais e la ventilazione avvengono alla base della struttura, mentre il condotto di estrazione dell'aria saturo è disposto al centro.

I vantaggi della dryeration sono riassumibili nei seguenti punti:

- incremento del 40 ÷ 50 % della capacità produttiva dell'essiccatoio (gli ultimi punti di umidità sono i più lunghi da eliminare; è destinata all'essiccazione anche la zona di raffreddamento del contenitore);
- risparmio di energia (termica + elettrica) del complesso essiccatoio-cella pari al 20 ÷ 40 %;
- migliore qualità della granella, che presenta un'incidenza di rotture pressoché dimezzata, per effetto della minore esposizione ad alte temperature.

Alimentazione con fonti di energia alternative

a) *Sottoprodotti agricoli* e relativo potere calorifero inferiore (prodotto con umidità inferiore al 15 %):

- paglia (14860 kJ/kg);
- tutoli e brattee (14020 kJ/kg);
- lolla di riso (13820 kJ/kg).

Paglia: in balle da 300 kg che alimentano direttamente il forno, oppure in balle da 500 kg che vengono triturate e convogliate nel forno pneumaticamente.

Brattee e tutoli provenienti dalle spighe raccolte intere, essiccate parzialmente e trebbiate a punto fisso (mais da seme) oppure raccolte durante la fase di mietitrebbiatura in campo (mais da granella).

Lolla di riso: sottoprodotto della lavorazione industriale.

b) *Collettori solari ad aria*

c) *Biogas* (prodotto dalla fermentazione dei liquami zootecnici).

Conservazione per refrigerazione

Tecnica adottata, per cereali ed altre granaglie, da circa un ventennio. In funzione dell'umidità della granella consente una conservazione per periodi più o meno lunghi:

- per periodi limitati (qualche settimana) con granella ad elevato contenuto di umidità (20 ÷ 30 %);
- per medi periodi con granella ad un'umidità del 17 ÷ 20 %;
- per lunghi periodi (anche più di un anno) con granella ad umidità inferiore al 17 %.

Oltre a ridurre il surriscaldamento e le perdite metaboliche della granella, la refrigerazione protegge il prodotto dall'attività di batteri, funghi e insetti, minimizza le perdite di massa e comporta una migliore resa alle successive lavorazioni.

La refrigerazione non dev'essere considerata come una tecnica alternativa all'essiccazione, ma integrativa dell'essiccazione. Infatti essa non riesce ordinariamente ad asportare più di due punti di umidità della massa.

Il processo misto di essiccazione e refrigerazione consente, rispetto alla sola essiccazione, di ottenere sensibili risparmi energetici, rendendo possibile la conservazione ad umidità più alta del prodotto (non occorre più estrarre quella quota di umidità finale che è proprio la più dispendiosa da eliminare).

La portata d'aria refrigerante (10 ° C) richiesta da questa tecnica si attesta sui 4 ÷ 5 m³/h . m³ di granella, con pressioni di esercizio di circa 100 ÷ 300 mm di colonna d'acqua, a seconda dell'altezza del prodotto. La refrigerazione cessa quando la temperatura dell'aria in uscita dal silo è di soli 2 ÷ 3 °C superiore a quella dell'aria fredda immessa nel silo. A tal punto la massa del cereale conserva per lungo tempo la temperatura ottenuta, essendo i cereali ottimi isolanti termici (per cui non si richiedono nemmeno contenitori di stoccaggio ben coibentati). Quando la temperatura del prodotto sale oltre un certo valore, si effettua un nuovo ciclo di refrigerazione.

La refrigerazione può essere applicata con qualsiasi tipo di silo o magazzino, sia con prodotto alla rinfusa che in sacchi. Importante è una corretta distribuzione della massa, tale da garantire un'efficace ed omogenea circolazione dell'aria.

Nei magazzini di tipo orizzontale si utilizzano canali di distribuzione appoggiati al pavimento; nelle celle di refrigerazione appositamente create la canalizzazione dell'aria può essere incorporata nel pavimento.

L'impianto in ogni caso deve prevedere:

- il gruppo frigorifero;
- il ventilatore di raffreddamento del condensatore inserito nel gruppo frigorifero;
- il ventilatore d'aria fredda.